TEKO Schweizerische Fachschule

Diplomarbeit Elektrotechniker HF



DartVision — Automatisches Darterkennungssystem

Kamerabasierte Erkennung und Auswertung von Dartwürfen

Diplomand:	Timo Meier
Schule:	TEKO Olten
Klasse:	O-TEL-23-T-a
Ausbildung:	Elektrotechniker HF
Jahr:	2023 - 2026

Aufgabenstellung

Mit der Diplomarbeit werden Sie das, während dem gesamten Studium aufgebaute Grundlagenwissen an einer praxisorientierten Aufgabe in Ihrer Studienrichtung anwenden und vertiefen. Dabei geht es für Sie im Wesentlichen um die konsequente Zielorientierung, die Anwendung der Phasen des Projektmanagements sowie die konsequente Umsetzung von definierten Rahmenbedingungen.

Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten wurden Sie eingehend über diese Rahmenbedingungen sowie die Durchführung der Diplomarbeit informiert. Bei der Realisierung der Diplomarbeit müssen Sie nun den folgenden Punkten besondere Beachtung schenken:

- Die einzelnen Schritte, welche als Summe zum Ergebnis geführt haben, müssen beschrieben sein.
- Wurden im Rahmen der Lösungsfindung verschiedene Varianten entworfen und geprüft, muss die Evaluation der gewählten Variante mittels einer dazu geeigneten Methode dokumentiert und begründet sein.
- Bei der Dokumentation der Diplomarbeit ist auf einen logischen Aufbau, eine saubere Gliederung sowie auf gute Verständlichkeit zu achten. Details sind in den Richtlinien zur Diplomarbeit beschrieben.
- Der Value-add (Mehrwert) des Ergebnisses für den Auftraggeber muss aus der Dokumentation klar erkennbar und nachvollziehbar sein.
- Für die optimale Begleitung muss dem Diplomlehrer ein wöchentlicher Statusbericht (gemässe Vorlage Extranet TEKO) zugestellt werden. Dies ermöglicht dem Diplomlehrer den Verlauf unmittelbar mitverfolgen und bei Bedarf gezielt reagieren zu können.
- Der Fachexperte muss die Diplomarbeit gemäss den Kriterien auf dem durch den Diplomlehrer abgegebenen Bewertungsformular beurteilen. Der Fachexperte sendet das Formular bis spätestens eine Woche nach Abgabe der Diplomarbeit an den Diplomlehrer.
- Die Präsentation der Diplomarbeit muss so ausgestaltet sein, dass eine aussenstehende, fachunabhängige Person innerhalb von 15 Minuten die folgenden Punkte erkennen und bewerten kann:
  - Auftrag sowie Sinn und Zweck
  - Endergebnisse und Erfolgskriterien
  - besondere Herausforderungen auf dem Weg zum Ziel inkl. gewählte Lösungsansätze mit Begründung, jedoch ohne sich in Details zu verlieren
  - Demo des Produktes, Prototyps etc.
  - Reflexion: Zielerreichung, Weg zum Ziel, lessons learnt
- Im Anschluss an die Präsentation des Ergebnisses muss innerhalb von 2 Minuten die Onlinepublikation der Diplomarbeit vorgestellt werden. Die Onlinepublikation wird bewertet und muss so ausgestaltet sein, dass Aussenstehende in einer attraktiven, kreativen und leicht verständlichen Form sich über die erarbeitete Diplomarbeit informieren können.

Die Begleitung und die Bewertung der Diplomarbeit durch den Diplomlehrer richten sich konsequent nach dem vom Auftraggeber genehmigten und unterzeichneten Pflichtenheft, den im Dokument "Auftrag zur Konkretisierung des Themas für die Diplomarbeit" definierten Rahmenbedingungen sowie dem im Extranet verfügbaren Beurteilungsraster.

1 Management Summary

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Bau von DartVision, einem kamerabasierten System, das geworfene Dartpfeile automatisch erkennt, der richtigen Wertungszone zuordnet, den Spielstand selbstständig führt und auf einem Display wiedergibt.

1.1 Ausgangslage

Beim klassischen Steeldart wird der Punktestand nach jeder Aufnahme von Hand abgelesen, subtrahiert und notiert. Das unterbricht den Spielfluss und ist fehleranfällig. Ablese-, Rechen- und Übertragungsfehler gehören zu jedem Dartabend. Gewerbliche Systeme lösen das, kosten aber sehr viel.
Richtziel dieser Arbeit ist ein funktionsfähiger, betriebsbereiter Prototyp auf Mikrocomputerbasis, zu einem vernünftigen Preis. Er erkennt Würfe automatisch, ordnet sie nach Segment und Ring zu, führt den Spielstand für 501 und 301 für ein bis zwei Spieler regelkonform, meldet Spielereignisse über ein Touch-Display und ein LED-Band zurück und arbeitet autark in einem eigenen Funknetz. Nach dem Einschalten ist er ohne weiteren Eingriff betriebsbereit. Aus dem Richtziel wurden sieben Endergebnisse, 25 verbindliche Anforderungen und sieben Erfolgskriterien abgeleitet. Entscheidend war, jede Anforderung so zu formulieren, dass sie prüfbar ist.

1.2 Vorgehen

Auf die Initialisierung, mit Erstellung des detaillierten Pflichtenheftes, folgte die Planung mit Strukturplan, Ablaufplan, Kommunikationsplanung und Risikoanalyse. Für die Lösung selbst wurden keine vollständigen Gesamtkonzepte gegenübergestellt, sondern sechs Gegenstände einzeln verglichen: Rechenplattform, Anzeigerechner, Lichtansteuerung, Netzteil, Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek. Jeder wurde mit einer Präferenzmatrix gewichtet und mit einer Nutzwertanalyse bewertet. Der Zuschnitt macht jeden Entscheid für sich nachvollziehbar und lässt einen Gegenstand austauschen, ohne das ganze Konzept neu bewerten zu müssen.
Die Ausarbeitung lief in sieben aufeinander aufbauenden Phasen: Energieversorgung und Beleuchtung, mechanischer Aufbau, Kalibrierung, Erkennung und Wertung, Spiellogik und Anzeige, Ereignisfarben und Betriebsführung sowie die abschliessende Evaluation der Anforderungen. Jede Phase schloss mit einem überprüfbaren Ergebnis. Eingesetzt wurden Python mit OpenCV für die Bildverarbeitung und PyQt6 für die Bedienoberfläche. Beides war nicht Bestandteil des Bildungsgangs. Deshalb wurde Wissen vor der Umsetzung an kleinen, lauffähigen Beispielen erarbeitet. Für die Umsetzung des Hauptprogrammes diente ein KI-gestütztes Werkzeug. Vorgaben, Integration und Prüfung lagen beim Verfasser.
Gesteuert wurde das Vorhaben über den Projektablaufplan. Er wurde laufend im IST/SOLL-Vergleich nachgeführt, sodass jederzeit sichtbar war, welche Arbeitspakete offen, in Arbeit oder abgeschlossen sind. Abweichungen fielen so frühzeitig auf. Die Dokumentation wurde ebenfalls laufend geführt und nicht erst am Schluss verfasst. Auch der Nachweis folgte diesem Grundsatz: Der Prüfplan stand vor der ersten Messung und aus ihm entstanden acht Prüfprotokolle P-01 bis P-08.

1.3 Ergebnisse

Der Prototyp ist gebaut, in Betrieb und abgenommen. Alle sieben Endergebnisse sind erfüllt und jedes der sieben Erfolgskriterien ist erreicht.

Endergebnis	Gefordert	Erreicht
E1 Hardware-Prototyp	vollständig aufgebaut und betriebsbereit	betriebsbereiter Prototyp vorhanden
E2 Erkennung und Wertung	mindestens 80 Prozent	90 Prozent bei 200 Würfen, Erkennung in unter 3,5 Sek.
E3 Spiellogik	301 und 501 regelkonform, Punktestand korrekt	beide Varianten getestet, Testspiele mit über 200 Würfe durchgehend korrekt
E4 Bedienoberfläche	Korrigieren und Nachtragen ohne Spielabbruch	9 von 9 Korrekturfällen, 10 von 10 Nachträgen, kein Abbruch
E5 Ereignisfarben	in mindestens 8 von 10 Fällen die richtige Farbe	10 von 10, über den ganzen Spielbetrieb geprüft
E6 Autarker Betrieb	spielbereit in drei Minuten, ohne fremdes Netz	< 121 Sek., Spiel im eigenen Netz geprüft
E7 Projektdokumentation	vollständig	vollständig dokumentierte Arbeit

Vierundzwanzig der fünfundzwanzig Anforderungen sind in einem der acht Protokolle mit Sollwert, Messwert und Ergebnis nachgewiesen. Die fünfundzwanzigste ist über die dokumentierte Evaluation belegt. Keine Anforderung blieb offen. Neun von neun Korrekturfälle und acht von acht Punkten zum Spielablauf sind am Gerät bestanden.
Der Materialaufwand beträgt 518.02 CHF für den DartVision-Aufbau und 648.02 CHF mit Dartscheibe und Ständer. Das zum Vergleich herangezogene gewerbliche System kostet auf gleicher Grundlage rund 987.00 CHF ohne Display, Dartscheibe und Ständer.
Abweichungen sind erkannt und benannt. Die schwächste Stelle ist der Doppelring mit 65,2 Prozent richtiger Zuordnung gegenüber 90 bis 100 Prozent in den übrigen Ringen bei den 200 dokumentierten Würfen. Aufgehalten hat das Projekt dabei nichts aus dem Stoff des Bildungsgangs. Energieversorgung, Verdrahtung, Lastbilanz und Messtechnik liefen durch. Aufgehalten hat ausschliesslich das, was darüber hinausgeht. Dazu sind bei jeder Phase die Schwierigkeiten festgehalten worden. Alle Termine wurden eingehalten.

1.4 Ausblick

Nachdem die Anlage die geforderten Erfolgskriterien erfüllen konnte, gehen die Überlegungen bereits Richtung zweiter Prototypenstufe. Sie verfolgt kein neues Verfahren, sondern behebt die bekannten Schwächen des ersten Aufbaus: mechanisch ein Rahmen aus Aluminium statt der bisherigen Trägerplatte sowie kompaktere und stabilere Gehäuse. Die Vereinfachung des LED-Lichtes und dadurch Einsatz von Standard-Netzteil. Entwicklung einer eigenen LED-Kamera-Halterung mit Möglichkeit zur kommerziellen Nutzung. In der Umgebung die Anbindung an ein Tablet/Handy als Erweiterung. Im Programm eine höhere Trefferquote im Doppelring und der Ausbau der Spielarten.
Durch die Anpassungen am Aufbau können weitere Kosten eingespart werden.

2 Inhaltsverzeichnis

1 Management Summary ... 3
1.1 Ausgangslage ... 3
1.2 Vorgehen ... 3
1.3 Ergebnisse ... 3
1.4 Ausblick ... 4
2 Inhaltsverzeichnis ... 5
3 Kurzer beruflicher Lebenslauf ... 7
4 Qualifikationsprofil ... 8
5 Projektinitialisierung ... 10
5.1 Pflichtenheft ... 10
5.2 Zielscheibe ... 12
5.3 Funktionale und technische Anforderungen ... 13
5.4 Abgrenzungen ... 15
5.5 Zukauf und Eigenleistung ... 15
5.6 Termine und Meilensteine ... 16
6 Projektplanung ... 17
6.1 Vorgehensmodell ... 17
6.2 Projektstrukturplanung ... 17
6.3 Projektablaufplanung ... 20
6.4 Kommunikationsplanung ... 21
6.5 Risikoanalyse ... 22
7 Projektrealisierung ... 26
7.1 Analyse und Stand der Technik ... 26
7.2 Konzept und Evaluation ... 26
7.3 Evaluation der geeignetsten Variante ... 34
7.4 Resultat der Evaluation ... 37
8 Ausarbeitung DartVision ... 39
8.1 Phasenplan ... 39
8.2 Risikoanalyse ... 41
8.3 16er Matrix ... 42
8.4 Phase 1 – Energieversorgung und Beleuchtung ... 44
8.5 Phase 2 – mechanischer Aufbau ... 52
8.6 Arbeitsumgebung der Softwarephasen ... 60
8.7 Phase 3 – Kalibrierung ... 62
8.8 Phase 4 – Erkennung und Wertung ... 70
8.9 Phase 5 – Spiellogik und Anzeige ... 81
8.10 Phase 6 – Ereignisfarben und Betriebsführung ... 94
8.11 Phase 7 - Evaluation der funktionalen und technischen Anforderungen ... 105
8.12 Kosten-Nutzen-Analyse ... 110

9 Projektabschluss 111
9.1 Evaluation der Zielerreichung 111
9.2 Reflexion 114
9.3 Lessons learnt 115
9.4 Ausblick 116
9.5 Fazit 116
10 Projektüberwachung 117
10.1 IST/SOLL Vergleich PAP 117
11 Eigenständigkeitserklärung 118
12 KI-Nutzung 119
13 Verzeichnisse 121
13.1 Abbildungsverzeichnis 121
13.2 Tabellenverzeichnis 122
13.3 Literatur- und Quellenverzeichnis 124
14 Anhang 127
14.1 Projektstatusberichte 127
14.2 Meetingprotokolle 128
14.3 Lastberechnung und Auslegung des Netzteils 130
14.4 Präferenzmatrix 136
14.5 Nutzwertanalyse / Sensitivitätsanalyse 138
14.6 Testprotokolle 145
14.7 Befehlsreferenz 188
14.8 Beispiele der Aufträge an Claude Code 201

3 Kurzer beruflicher Lebenslauf

Geburtsdatum: 05.01.1987 Adresse: [redacted]

Telefon: [redacted] E-Mail: meier.timo@hotmail.com

BERUFSERFAHRUNG

03/2026 – heute **Projektleiter Fahrbahn**
SBB AG, Schweiz
• Planung und Leitung von Projekten im Bereich Fahrbahn.
• Koordination der Projektbeteiligten sowie Abstimmung der technischen und terminlichen Abläufe.
• Überwachung von Projektfortschritt, Terminen, Qualität und Umsetzung.

05/2022 – 02/2026 **Abteilungsleiter Entwicklung, Konstruktion und Testing**
Richard AG Murgenthal, Murgenthal
• Verantwortung für Entwicklung, Konstruktion und Testing verkaufsfähiger Systeme.
• Qualifikation und Förderung der Mitarbeitenden.
• Sicherstellung von Qualität und Lieferterminen.

03/2019 – 04/2022 **Key Account Manager / Kundenprojektleiter**
Richard AG Murgenthal, Murgenthal
• Abwicklung von Kunden- und internen Projekten.
• Betreuung und Beratung der Kunden von der Offertphase bis zur Erstlieferung.
• Überwachung und Dokumentation des gesamten Projektablaufs.

09/2015 – 01/2019 **Abteilungsleiter / Berufsbildner Mechanik**
Stiftung azb, Strengelbach
• Fachliche Führung der Ausbildungswerkstatt Mechanik.
• Durchführung von Ausbildungen, Umschulungen und Qualifizierungsmassnahmen.
• Sicherstellung der Kundenaufträge von der Akquise bis zum Warenausgang.

01/2015 – 07/2015 **Rekrutierungsspezialist**
Careerplus, Olten
• Rekrutierung und Begleitung von Kandidatinnen und Kandidaten im Bewerbungsprozess.

01/2009 – 12/2014 **Produktionsleiter / Stv. Produktionsleiter**
Kunz precision AG, Zofingen
• Mitarbeit in der Produktionsleitung und Stellvertretung des Produktionsleiters.
• Organisation und Begleitung der betrieblichen Ausbildung.

AUSBILDUNG

08/2003 – 08/2007 **Polymechaniker EFZ**
Kunz precision AG, Zofingen

WEITERBILDUNGEN

10/2023 – 11/2026 **Dipl. Elektrotechniker HF**
Höhere Fachschule TEKO Olten

08/2019 – 06/2024 **Ausbilder mit eidg. Fachausweis**
Lernwerkstatt Olten

04/2011 – 04/2014 **Dipl. Betriebstechniker HF**
Höhere Fachschule TEKO Olten

ZUSÄTZLICHE BERUFLICHE TÄTIGKEIT

01/2016 – 04/2022 **Prüfungsexperte EFZ**
Swissmechanic Lenzburg
• Expertentätigkeit bei Abschluss- und Zwischenprüfungen auf Stufe EFZ.

4 Qualifikationsprofil

A 1 Unternehmens- und Führungsprozesse gestalten und verantworten	• Änderungswesen verantwortet: Prozesse definiert und optimiert, Prozessreviews durchgeführt und Mitarbeitende befähigt. • Projektablauf an der Schnittstelle Entwicklung über strukturierte Übergaben und standardisierte Dokumentation optimiert. • Standardisierte Testprozesse für Hochspannungskomponenten definiert und eingeführt (reproduzierbare Prüfabläufe, klare Prüfzeiten). • Typprüfungen für Hochspannungskomponenten normgerecht geplant, durchgeführt und dokumentiert; Normkonformität sichergestellt. • Ausbildung Jugendlicher mit IV-Hintergrund strukturiert aufgebaut; SMART-Ziele und Feedbackgespräche eingeführt. • Rollen, Zuständigkeiten und Weiterbildungsbedarfe im Team klar definiert und geplant. • Teamziele SMART definiert und vereinbart; messbare Zielgrössen und regelmässige Kontrolle eingeführt. • Schwierige Situation eines Lernenden frühzeitig erkannt, vertraulich begleitet und mit HR/Fachstellen koordiniert. • Teammotivation durch Vorbildverhalten gefördert; offene, transparente Kommunikation und Einbezug etabliert. • Als Projektleiter erster Ansprechpartner für internationale Kunden (u. a. Entwicklungsprojekt Tram-Stromabnehmer). • Prozess «Dokumentieren von Prüfungen» zur Qualitätssicherung erarbeitet und eingeführt.
A 2 Kommunikation situationsangepasst und wirkungsvoll gestalten	• Prüfungen mit externen Prüflaboren abgestimmt (Anforderungen, Prüfbedingungen und Verantwortlichkeiten verbindlich festgelegt). • Als Projektleiter Krisensitzung mit internationalen Kunden (Zugausfälle Euro Dual) geleitet; Ursachen und Massnahmen präsentiert. • Prüfinformationen (EN 50206-1, EN 60077-1) zielgruppengerecht aufbereitet – Details für Prüflabore, Verdichtung fürs Management. • Tolerierungsantrag zur Schweissfreigabe erarbeitet und vor Fachkräften der Deutschen Bahn präsentiert. • Als Key Account Manager First Article Inspection während Corona vollständig per Videocall durchgeführt. • Als Projektleiter technische Meetings mit Ingenieuren der Bahnindustrie geleitet (branchenspezifische Fachterminologie). • Erstellung, Prüfung und Freigabe von Testberichten für Hochspannungskomponenten verantwortet. • Als Projektleiter Ansprechpartner für Kunde Stadler Valencia; technische Kommunikation und Abnahmen auf Englisch geführt.
A 3 Die persönliche Entwicklung reflektieren und vorantreiben	• Eigene Kompetenzanforderungen systematisch analysiert und Weiterbildung zum Elektrotechniker HF abgeleitet. • Als nicht ausgebildeter Konstrukteur die Abteilung übernommen, CAD-Grundlagen erlernt und InLoox verantwortet. • Eigene Erwartungshaltung reflektiert und angepasst; bewussten Umgang mit dem Leistungsanspruch nachhaltig etabliert.
B 4 Entwicklungsmethoden zur Problemlösung und Innovationsentwicklung in der Elektrotechnik zielführend einsetzen	• Nicht bestandene Isolationsprüfung (Vakuumhauptschalter) analysiert; Lösung durch Abrunden kritischer Kanten umgesetzt. • Prüfprozess ganzheitlich analysiert und standardisiert (technisch, normativ, wirtschaftlich, ökologisch). • Prüfwerte kritisch hinterfragt, normbasiert recherchiert und Herleitung externen Entscheidungsträgern aufgezeigt.
B 5 Elektrotechnische Projekte planen, leiten, ausführen und evaluieren	• Komplette Prüfreihen (EN 50206-2, EN 60077) eigenständig geplant und bis zur Abnahme umgesetzt. • Prüfreihen (EN 50206-1/2, EN 60077) ziel- und ergebnisorientiert geleitet und mit Kunden/Endkunden koordiniert.

	• Abteilung Testing geleitet: Personal, Prüfmittel und Zeitressourcen geplant und mit internen/externen Stellen abgestimmt. • Als Projektleiter durchgängige, transparente Kommunikation im Projekt Tram-Stromabnehmer sichergestellt. • Optimierungspotenziale in Prüfprozessen identifiziert, umgesetzt und standardisiert (Reproduzierbarkeit und Effizienz erhöht). • Interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Testing, Entwicklung und Produktion koordiniert.
B 6 Elektrotechnische Produkte entwickeln	• Typ- und Stückprüfungen an Hochspannungskomponenten verantwortet; Erkenntnisse in die Produktoptimierung eingebracht. • Entwicklungsschritte für Hochspannungskomponenten begleitet; Prüfergebnisse in den Entwicklungsprozess zurückgeführt. • Testing sowie RAM- und LCC-Analysen verantwortet; Schwachstellen identifiziert und Lebensdauer/Wartung optimiert.
B 7 Hardwarenahe Programme für Anlagen und Informationssysteme entwickeln	• Siemens-LOGO-Steuerungen für Prüfaufbauten entwickelt und Prüfabläufe automatisiert programmiert.
B 8 Elektrotechnische Anlagen projektieren	• Netzgeräte und DC-Stromquelle für normative Erwärmungstests (EN 50206, EN 60077) evaluiert und dimensioniert. • Typ- und Serienprüfungen normkonform verantwortet; Prüfumgebung energie- und ressourceneffizient ausgelegt. • Als Key Account Manager Projekte mit InLoox geplant und gesteuert (Termine, Ressourcen, Meilensteine). • Ansteuerung für die Dauerprüfung eines Trennschalters mit Siemens LOGO entwickelt und dokumentiert.
B 9 Elektrotechnische Anlagen in Betrieb setzen	• Normative Dauertests konzipiert und umgesetzt; Steuerungen entwickelt und Prüfanlagen in Betrieb genommen. • Normative Tests an elektrisch gesteuerten Hochspannungskomponenten durchgeführt und Steuerungslogik optimiert. • Interne Hochspannungsprüfungen durchgeführt und externe fachlich begleitet; Prüfvorgaben optimiert. • Dauertest an einem Vakuumhauptschalter geplant, programmiert und ausgewertet; Ergebnisse abnahmefähig aufbereitet.
B 10 Elektrotechnische Anlagen unterhalten	• Störungen an Hochspannungskomponenten systematisch analysiert, Ursachen behoben und Systeme validiert/freigegeben. • Optimierungspotenziale umgesetzt; Energie- und Materialeinsatz reduziert, Effizienz der Prüfstände gesteigert.
B 11 Testeinrichtungen konzipieren und herstellen	• Geeignete Mess- und Prüftechniken für physikalische Grössen (Temperatur, Kraft, Druck) ausgewählt und eingesetzt. • Mess- und Prüfsysteme für Hochspannungskomponenten konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. • Erwärmungsprüfungen an Stromabnehmern, Hauptschaltern und Trennern geplant, durchgeführt und ausgewertet. • Bei Grenzwertüberschreitungen kritische Stellen identifiziert und Massnahmen umgesetzt oder an die Produktion übergeben. • Als Key Account Manager die gesamte Prüfreihe eines neuen Tram-Stromabnehmers geplant, durchgeführt und dokumentiert.
B 12 Nachhaltiges Handeln	• Interaktionen mit internationalen Kunden, Prüflaboren und Lieferanten respektvoll und wertschätzend gestaltet. • Als Vorgesetzter Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz im Prüfbetrieb umgesetzt und weiterentwickelt.

5 Projektinitialisierung

5.1 Pflichtenheft

Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten wurde ein Pflichtenheft gemäss Vorgaben erarbeitet und freigegeben. Die Inhalte daraus werden in diesem Abschnitt eingefügt:

Herkunft der Idee

Die Idee entstand aus eigenem Interesse am Dartsport in Verbindung mit den im Bildungsgang erarbeiteten Grundlagen der Mikrocomputer- und Embedded-Technik. Eine Anfrage aus dem Freundeskreis nach einem preiswerten System für privat organisierte Dartturniere bestätigte den Bedarf. Die Arbeit verbindet Hardwareaufbau, Bildverarbeitung, Softwareentwicklung, Netzwerktechnik und Projektmanagement zu einer praxisnahen Gesamtlösung und dient zugleich als Nachweis, ein fachübergreifendes Projekt eigenständig von der Konzeption bis zur dokumentierten Inbetriebnahme führen zu können.

Ausgangslage

Beim klassischen Steeldart muss der Punktestand nach jeder Aufnahme von Hand abgelesen, subtrahiert und notiert werden. Das unterbricht den Spielfluss und ist fehleranfällig. Ablese-, Rechen- und Übertragungsfehler gehören zum Alltag jedes Dartabends ohne automatisches System. In dieser Diplomarbeit entsteht ein automatisches Darterkennungssystem, das geworfene Dartpfeile mit drei Kameras selbstständig erkennt, der korrekten Wertungszone zuordnet und den Punktestand automatisch führt.

Marktübersicht und Abgrenzung

Auf dem Markt existieren bereits kamerabasierte Auswertungssysteme für Steeldart. Die beiden relevantesten:

- Autodarts (autodarts.io): Ein community-getriebenes System aus drei Kameras und einer Auswertungssoftware. Die Erkennung läuft lokal, Spielverwaltung und Mehrspielerbetrieb setzen jedoch ein Benutzerkonto und eine Internetverbindung zur Plattform voraus. Kamerahalterungen und Rechner sind selbst zu beschaffen.
- Scolia: Ein kommerzielles Komplettsystem mit hoher Erkennungsgüte. Anschaffungskosten im Bereich von rund 1000 Franken aufwärts, geschlossenes System, auf eine Internetanbindung ausgelegt.

DartVision unterscheidet sich von beiden in zwei Punkten: Erstens arbeitet das System vollständig eigenständig. Erkennung, Spiellogik, Anzeige und Lichtsteuerung laufen lokal auf eigener Hardware und benötigen weder Internetanbindung noch Benutzerkonto. Das System spannt sein eigenes Funknetz auf und ist damit an jedem Ort betriebsbereit. Zweitens ist es als preiswertes Gesamtsystem aus frei erhältlichen Komponenten konzipiert.

Richtziel

Richtziel ist ein funktionsfähiger, betriebsbereiter Prototyp eines kamerabasierten Dart-Auswertungssystems auf Mikrocomputerbasis. Das System erkennt geworfene Dartpfeile automatisch, ordnet sie der korrekten Wertungszone zu (Single, Double, Triple, Bull, Bullseye, Fehlwurf) und führt den Spielstand für die Spielvarianten 501 und 301 für ein bis zwei Spieler zuverlässig und regelkonform. Relevante Spielereignisse werden über ein Touch-Display und ein LED-Band zurückgemeldet. Das System arbeitet autark in einem eigenen Funknetz und ist nach dem Einschalten ohne weitere Eingriffe betriebsbereit.

Systemübersicht

Das System besteht aus drei Teilsystemen mit klar definierten Schnittstellen: der Erkennungseinheit (Mikrocomputer mit drei Kameras), der Anzeigeeinheit (Mikrocomputer mit Touch-Display) und der Lichteinheit (LED-Controller mit adressierbarem LED-Band im Kameraring). Die Einheiten kommunizieren über ein eigenes WLAN, dessen Zugangspunkt die Erkennungseinheit aufspannt. Die Energieversorgung erfolgt zentral aus einem Kleinspannungsnetzteil mit abgesicherter Verteilung.
Die konkrete Auswahl der Komponenten Mikrocomputer, Kameras, Display, LED-Controller und Netzteil erfolgt im Rahmen der Diplomarbeit anhand einer dokumentierten Evaluation gegen die in Kapitel 5.3 festgelegten Anforderungen (siehe A21).

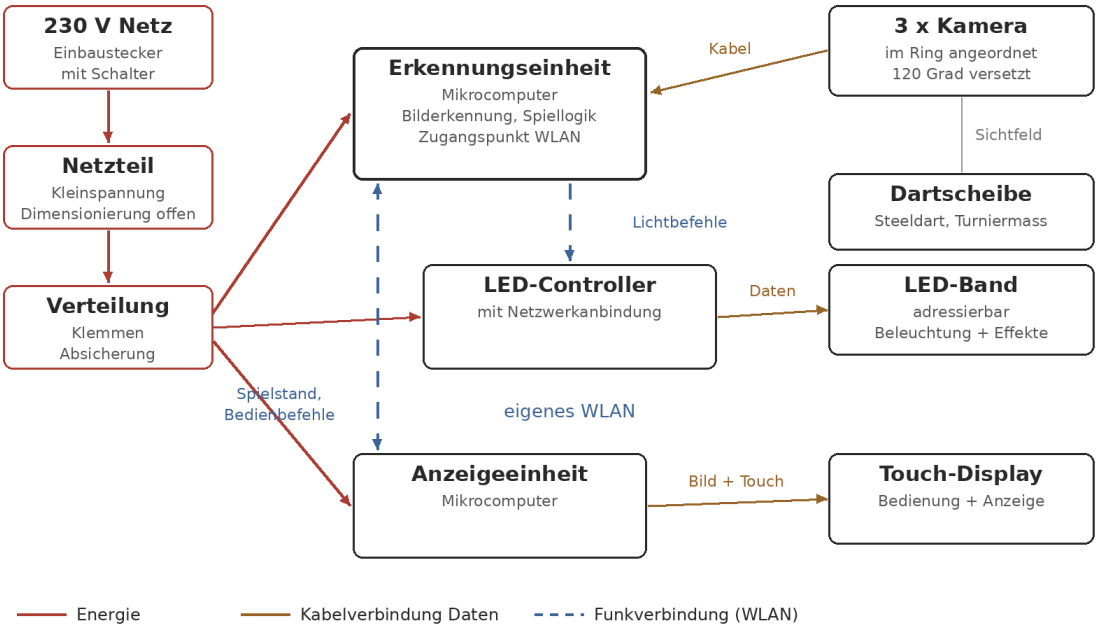
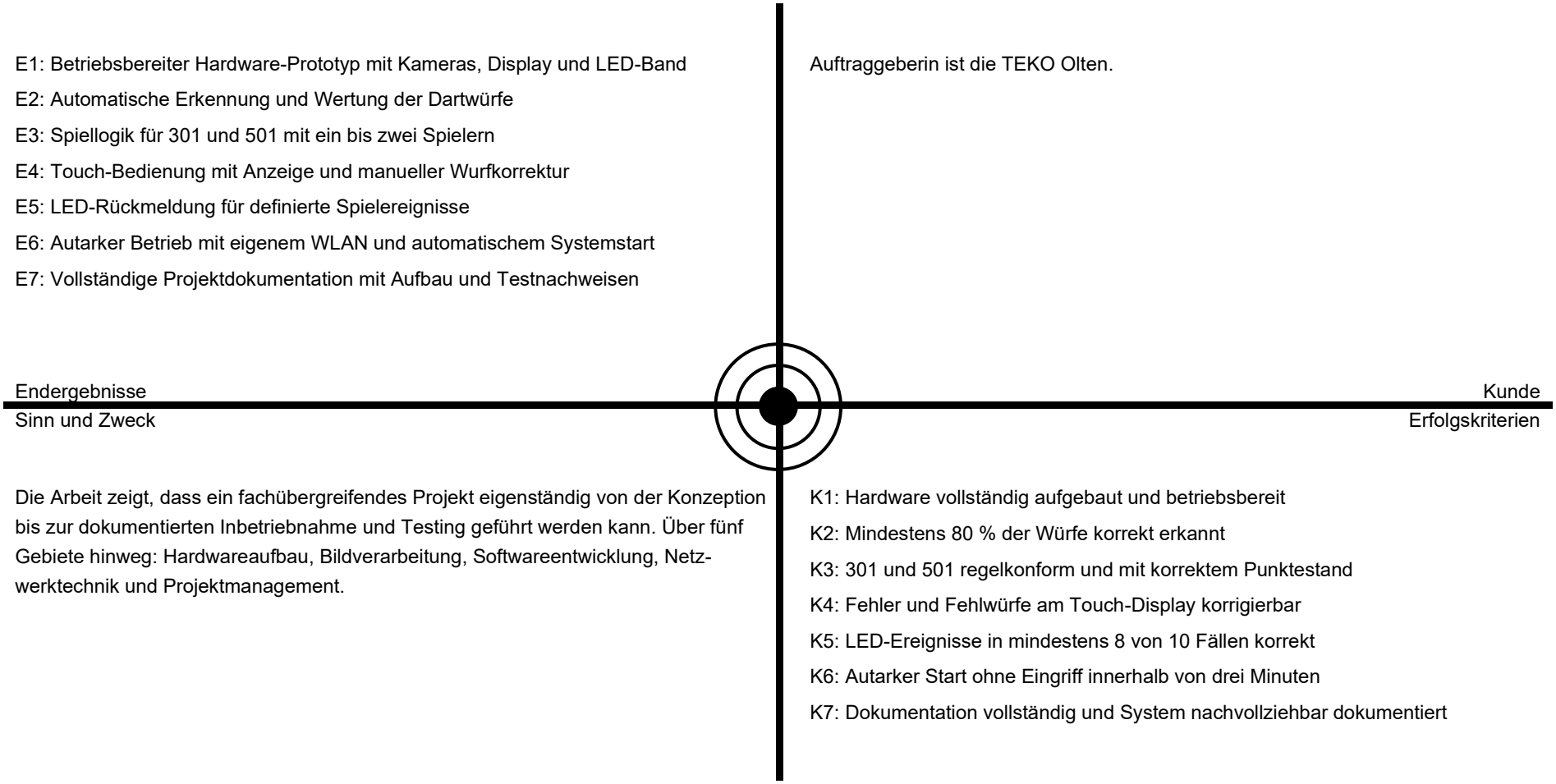


Abbildung 1: Funktionsblöcke und Schnittstellen

System und Schnittstellen: Das System benötigt einzig einen 230 V Netzanschluss. Es besteht keine Abhängigkeit von fremder Netzwerkinfrastruktur, Internetzugang oder externen Diensten. Ein Laptop kann sich zu Wartungszwecken als zusätzlicher Teilnehmer mit dem Funknetz verbinden (SSH-Fernzugriff). Für den Spielbetrieb ist er nicht erforderlich.

5.2 Zielscheibe

Richtziel: Ein funktionsfähiger, betriebsbereiter Prototyp eines kamerabasierten Dart-Auswertungssystems auf Mikrocomputerbasis. Autark im eigenen Funknetz, nach dem Einschalten ohne weitere Eingriffe betriebsbereit.



E1: Betriebsbereiter Hardware-Prototyp mit Kameras, Display und LED-Band
E2: Automatische Erkennung und Wertung der Dartwürfe
E3: Spiellogik für 301 und 501 mit ein bis zwei Spielern
E4: Touch-Bedienung mit Anzeige und manueller Wurfkorrektur
E5: LED-Rückmeldung für definierte Spielereignisse
E6: Autarker Betrieb mit eigenem WLAN und automatischem Systemstart
E7: Vollständige Projektdokumentation mit Aufbau und Testnachweisen

Auftraggeberin ist die TEKO Olten.

Die Arbeit zeigt, dass ein fachübergreifendes Projekt eigenständig von der Konzeption bis zur dokumentierten Inbetriebnahme und Testing geführt werden kann. Über fünf Gebiete hinweg: Hardwareaufbau, Bildverarbeitung, Softwareentwicklung, Netzwerktechnik und Projektmanagement.

K1: Hardware vollständig aufgebaut und betriebsbereit
K2: Mindestens 80 % der Würfe korrekt erkannt
K3: 301 und 501 regelkonform und mit korrektem Punktestand
K4: Fehler und Fehlwürfe am Touch-Display korrigierbar
K5: LED-Ereignisse in mindestens 8 von 10 Fällen korrekt
K6: Autarker Start ohne Eingriff innerhalb von drei Minuten
K7: Dokumentation vollständig und System nachvollziehbar dokumentiert

Tabelle 1: Zielscheibe

5.3 Funktionale und technische Anforderungen

Die folgenden Anforderungen konkretisieren die Endergebnisse. Alle Anforderungen sind verbindlich.

Erkennung und Wertung

ID	Anforderung	Kriterium
A1	Das System erkennt einen geworfenen Dart automatisch und zeigt die Wertung auf dem Display an.	Anzeige innerhalb von 5 s nach dem Einstich
A2	Die Zuordnung erfolgt zu Segment (1-20, Bull) und Ring (Single, Double, Triple, Bull, Bullseye).	mind. 80 % korrekt bei 25 Würfen (K2)
A3	Das Ziehen der Darts erzeugt keine zusätzlichen Wertungen (Schutz vor Doppelwertung).	Testprotokoll: Ziehen nach jeder Aufnahme
A4	Eine Aufnahme umfasst drei Darts; danach wartet das System auf das Entfernen, bevor neu gewertet wird.	Vorführung
A5	Vor dem Spielstart prüft das System die korrekte Zuordnung der drei Kameras. Bei einer Abweichung wird der Start nicht selbstständig fortgesetzt, sondern eine Warnung mit den Messwerten angezeigt; das Fortsetzen erfordert eine ausdrückliche Bestätigung durch den Bediener.	Vorführung Prüfablauf mit vertauschter Kamer

Tabelle 2: Erkennung und Wertung

Spiellogik

ID	Anforderung	Kriterium
A6	Spielvarianten 501 und 301, wählbar am Display; ein oder zwei Spieler; Double-Out zuschaltbar.	Vorführung Spielstart
A7	Überwurf (Bust) stellt den Reststand der Aufnahme zurück und beendet sie regelkonform. Sieg nur mit gültigem Abschlusswurf bei aktivem Double-Out.	automatisierte Tests, Testspiel
A8	Der Spielzustand wird bei jeder Änderung vollständig an die Anzeige übertragen. Nach einem Verbindungsunterbruch ist die Anzeige mit der ersten Nachricht wieder synchron.	Vorführung: Neustart der Anzeige im laufenden Spiel

Tabelle 3: Spiellogik

Bedienung und Korrektur

ID	Anforderung	Kriterium
A9	Jeder Dart der angezeigten Aufnahme ist am Touch-Display korrigierbar: Wert ändern, als Fehlwurf setzen, löschen.	Vorführung definierter Fälle
A10	Ein nicht erkannter Dart lässt sich über die leere Wurfkachel nachtragen.	Vorführung
A11	Unmittelbar nach einem Spielerwechsel bleibt die letzte Aufnahme des vorherigen Spielers korrigierbar.	Vorführung
A12	Korrekturen wirken regelkonform: Ein durch Korrektur entstehender oder entfallender Überwurf beziehungsweise Sieg wird automatisch richtig behandelt.	automatisierte Tests
A13	Nach Spielende bietet die Anzeige ein neues Spiel mit gleichen Einstellungen oder die Rückkehr ins Hauptmenü an.	Vorführung
A14	Die Bedienoberfläche läuft im Vollbild auf der gewählten Displayauflösung; Punktestände sind aus 2.37 Metern Entfernung ablesbar, Schaltflächen sind fingertauglich dimensioniert.	Sichtprüfung am Aufbau

Tabelle 4: Bedienung und Korrektur

Licht

ID	Anforderung	Kriterium
A15	Im Spielbetrieb leuchtet das LED-Band konstant weiss als Kamerabeleuchtung.	Sichtprüfung
A16	Definierte Ereignisse lösen Farbeffekte aus: Startsequenz beim Systemstart, Überwurf, Sieg. Effekte erfolgen nur an Aufnahmegrenzen, damit die Bilderkennung nicht gestört wird; danach kehrt das Band selbstständig zu Weiss zurück.	Testprotokoll 8 von 10 (K5)

Tabelle 5: Licht

Betrieb und Netzwerk

ID	Anforderung	Kriterium
A17	Das System spannt ein eigenes WLAN auf; Anzeige und LED-Controller verbinden sich automatisch. Fremde Netzwerkinfrastruktur ist nicht erforderlich.	Vorführung ohne Heimnetz
A18	Nach dem Herstellen der Netzspannung starten alle Teilsysteme selbstständig; das System ist ohne Tastatur, Maus oder Laptop innerhalb von drei Minuten spielbereit.	Vorführung Kaltstart (K6)
A19	Ein Laptop kann sich zu Wartungszwecken mit dem Funknetz verbinden (SSH); für den Spielbetrieb ist er nicht erforderlich.	Vorführung
A20	Die Energieversorgung erfolgt aus einem zentralen Netzteil mit abgesicherter Verteilung und einem einzigen Netzanschluss 230 V. Die Dimensionierung erfolgt anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher mit Reserve.	Aufbaukontrolle, Schaltungsübersicht

Tabelle 6: Betrieb und Netzwerk

Komponentenauswahl

ID	Anforderung	Kriterium
A21	Die Auswahl der Komponenten (Mikrocomputer, Kameras, Display, LED-Controller, Netzteil) erfolgt im Rahmen der Arbeit anhand einer dokumentierten Evaluation gegen die Anforderungen dieses Kapitels.	Evaluationskapitel in der Dokumentation
A22	Die Kameras liefern eine Auflösung, die die geforderte Erkennungsgüte nach K2 ermöglicht, und lassen sich am gewählten Mikrocomputer gleichzeitig betreiben.	Nachweis im Testprotokoll
A23	Der Mikrocomputer der Erkennungseinheit verarbeitet drei Kamerabilder gleichzeitig und stellt gleichzeitig einen WLAN-Zugangspunkt bereit.	Dauerlauftest unter Volllast
A24	Das Netzteil ist auf den maximalen Gesamtstrom aller Verbraucher mit Reserve ausgelegt; die Auslegung wird rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen.	Lastberechnung und Strommessung
A25	Das Display ist als Touch-Display ausgeführt und ohne zusätzliche Eingabegeräte bedienbar.	Vorführung

Tabelle 7: Komponentenauswahl

5.4 Abgrenzungen

Nicht Bestandteil dieser Arbeit sind:

- Weitere Spielvarianten (z. B. Cricket, Shanghai) über 501/301 hinaus
- Eingabe von Spielernamen; die Spieler werden als Player 1 und Player 2 geführt
- Spielhistorie und Statistikauswertung über den laufenden Average hinaus
- Internet-, Cloud- oder App-Anbindung sowie Online-Mehrspielerbetrieb
- Erkennung von abgeprallten Darts (Bounce-Outs), die nicht im Board stecken bleiben; solche Würfe werden über die Korrekturfunktion erfasst
- Produktzertifizierung (z. B. CE) und Serienreife; es entsteht ein dokumentierter Prototyp

5.5 Zukauf und Eigenleistung

Zugekaufte Produkte und übernommene Komponenten:

Komponente	Art
Mikrocomputer für Erkennungs- und Anzeigeeinheit inkl. Speichermedien	Zukauf Hardware
3 x Kamera mit Kabelanbindung	Zukauf Hardware
Touch-Display	Zukauf Hardware
LED-Controller mit Netzwerkanbindung, adressierbares LED-Band	Zukauf Hardware
Netzteil, Verteil- und Sicherungsmaterial, Material für Gehäuse und Halterungen	Zukauf Hardware
Steeldartscheibe (Turniermass) mit Umrandung	Zukauf Hardware
Firmware des LED-Controllers (quelloffen)	Übernommen, nur konfiguriert
Betriebssystem der Mikrocomputer, Programmbibliotheken für Bildverarbeitung und Oberfläche	Übernommen als Basis

Tabelle 8: Zukauf und Eigenleistung

Eigenentwicklung und Eigenleistung im Rahmen der Arbeit:

Leistung	Art
Konzeption des Gesamtsystems, Plattform-Evaluation und Komponentenwahl	Eigenleistung Konzept
Konstruktion und Fertigung der Displayhalterungen sowie des Trägeraufbaus	Eigenleistung Mechanik
Druck der Kamera- und LED-Halterung per 3D Druck (keine Eigenkonstruktion)	Eigenleistung Fertigung
Konstruktion und Druck der Mikrocomputer-Gehäuse	Eigenleistung Mechanik
Elektrischer Aufbau: Energieverteilung, Absicherung, Verdrahtung, Inbetriebnahme mit Messprotokollen	Eigenleistung Elektro
Anzeige-Anwendung für das Touch-Display einschliesslich Bedienkonzept und Gestaltung	Eigenentwicklung Software
Gesamte Projektdokumentation einschliesslich Testprotokollen	Eigenleistung Dokumentation

Tabelle 9: Eigenentwicklung und Eigenleistung im Rahmen der Arbeit

Eigenentwicklung Software (KI-unterstützt)

Leistung	Art
Gesamte Erkennungssoftware: Kalibrierung (Linsenkorrektur, Boardgeometrie), Hintergrunddifferenz, Linienfusion der drei Kameraansichten, Wertungslogik mit Schutz vor Doppelwertungen	Eigenentwicklung Software (KI-Unterstützt)
Gesamte Spiellogik einschliesslich Korrekturfunktion, mit automatisierter Testabdeckung	Eigenentwicklung Software (KI-Unterstützt)
Netzwerkkonzept (eigenes WLAN, Protokoll zwischen den Teilsystemen) und Selbststart	Eigenentwicklung Software (KI-Unterstützt)

Tabelle 10: Eigenentwicklung Software (KI-unterstützt)

Die in dieser Tabelle aufgeführten Softwarekomponenten werden in Zusammenarbeit mit einem KI-gestützten Entwicklungswerkzeug (Claude Code) erarbeitet. Der Grund liegt in der Komplexität dieser Teilsysteme, welche über das im Bildungsgang vermittelte Wissen hinausgeht. Die Live-Bildauswertung mit Linsenkorrektur, Hintergrunddifferenz und Fusion mehrerer Kameraansichten war ebenso wenig Bestandteil der Studienfächer wie die netzwerkseitige Kopplung mehrerer eigenständiger Teilsysteme.
Der Aufbau der Software wird vorgängig eigenständig durch Recherche ermittelt und in klar abgegrenzte Funktionsblöcke unterteilt. Diese werden anschliessend schrittweise umgesetzt. Konzept, Vorgaben, Integration, Inbetriebnahme sowie Test und Verifikation liegen beim Verfasser. Die künstliche Intelligenz dient als Hilfsmittel zur Codeerstellung und ersetzt die konzeptionelle Arbeit nicht. Die Verantwortung für Funktion und Nachvollziehbarkeit des Gesamtsystems verbleibt vollumfänglich beim Verfasser.

5.6 Termine und Meilensteine

Termin	Meilenstein
23.08.2026	Abgabe dieses Pflichtenhefts an den Diplomlehrer (Word-Dokument per E-Mail)
Bis 14.09.2026	Genehmigung und Unterschrift durch den Fachexperten
14.09.2026	Start der Diplomarbeit; Entgegennahme der offiziellen Aufgabenstellung (TEAMS)
28.09.2026	Vorzeigetermin 1: Ziele, Projektplanung, aufgetretene Probleme
16.10.2026	Vorzeigetermin 2: Standortbestimmung, Struktur der Dokumentation
09.11.2026	Abgabe der Diplomarbeit
19.11.2026	Onlinepublikation freigeben
20.11.2026	Präsentation

Tabelle 11: Termine und Meilensteine

6 Projektplanung

6.1 Vorgehensmodell

Für die Diplomarbeit wird das 5-Phasen-Modell verwendet. Es hilft dabei, das komplexe Projekt in klar getrennte Schritte zu gliedern und den aktuellen Stand laufend zu kontrollieren. Besonders wichtig ist die eigene Phase der Projektüberwachung, da sich der Zeitbedarf für einzelne Arbeiten nur schwer im Voraus abschätzen lässt. Dadurch können Verzögerungen oder Probleme früh erkannt und die Planung rechtzeitig angepasst werden.

Phase	Bezeichnung	Phase	Bezeichnung
1	Projektinitialisierung	4	Projektabschluss
2	Projektplanung	5	Projektüberwachung
3	Projektrealisierung		

Tabelle 12: Projektphasen

6.2 Projektstrukturplanung

Der Projektstrukturplan gliedert die Arbeit in Pakete. Gewählt sind diese Pakete nicht frei: Jedes trägt eine Gruppe von Anforderungen und die Anforderungen selbst gehen auf den Auftrag zurück.
Am Anfang dieser Kette stehen sieben Endergebnisse, jedes mit einem Erfolgskriterium, das es messbar macht. Die fünfundzwanzig Anforderungen konkretisieren diese sieben: Jede Anforderung gehört zu genau einem Endergebnis und jedes Endergebnis wird von mindestens einer Anforderung detaillierter beschrieben.
Das Pflichtenheft führt die Anforderungen bereits in sechs Sachgruppen: Erkennung und Wertung, Spiellogik, Bedienung und Korrektur, Licht, Betrieb und Netzwerk sowie Komponentenauswahl. Jede dieser Gruppen beschreibt, was eine bestimmte Einheit der Anlage können muss. Diese Einheit ist das Arbeitspaket.
Aus den sechs Gruppen werden damit sechs Pakete unter der Projektrealisierung. Eine Gruppe teilt sich auf: Betrieb und Netzwerk trifft mit A17 bis A19 die Betriebsführung und mit A20 die Energieversorgung, weil Stromversorgung und Funknetz zwar beide zum Betrieb gehören, aber verschiedene Arbeit verlangen. Zwei Pakete stehen für sich. Die Mechanik löst keine Anforderung unmittelbar ein, ist aber die Voraussetzung für A1 bis A5: Ohne feste und reproduzierbare Geometrie ist keine gültige Kalibrierung möglich und ohne Kalibrierung keine Wertung. Konzept und Evaluation wiederum sind selbst gefordert, nämlich von A21.

Von den Endergebnissen zu den Anforderungen

Endergebnis mit seinem Erfolgskriterium	Anforderungen
E1 Betriebsbereiter Hardware-Prototyp K1 — Hardware vollständig aufgebaut und betriebsbereit	A20 · A22 · A23 · A24 · A25
E2 Automatische Erkennung und Wertung K2 — mindestens 80 Prozent der Würfe korrekt erkannt	A1 bis A5 · A15
E3 Spiellogik für 301 und 501 K3 — regelkonform und mit korrektem Punktestand	A6 bis A8
E4 Touch-Bedienung und Wurfkorrektur K4 — Fehler und Fehlwürfe am Display korrigierbar	A9 bis A14
E5 LED-Rückmeldung für Spielereignisse K5 — in mindestens 8 von 10 Fällen die richtige Farbe	A16
E6 Autarker Betrieb mit eigenem Funknetz K6 — Start ohne Eingriff innerhalb von drei Minuten	A17 bis A19
E7 Vollständige Projektdokumentation K7 — vollständig und nachvollziehbar dokumentiert	A21

Abbildung 2: Von den Endergebnissen zu den Anforderungen

Von den Anforderungen zu den Arbeitspaketen

Anforderungsgruppe im Pflichtenheft	Arbeitspaket im Projektstrukturplan
Erkennung und Wertung A1 bis A5	**Erkennungseinheit**
Spiellogik A6 bis A8	**Erkennungseinheit und Anzeigeeinheit**
Bedienung und Korrektur A9 bis A14	**Anzeigeeinheit**
Licht A15 und A16	**Lichteinheit**
Betrieb und Netzwerk A17 bis A20	**Betriebsführung (A17 bis A19)** **Energieversorgung (A20)**
Komponentenauswahl A21 bis A25	**Konzept und Evaluation**
ohne eigene Anforderung	**Mechanik** Voraussetzung für A1 bis A5: ohne feste Geometrie keine gültige Kalibrierung

Abbildung 3: Von den Anforderungen zu den Arbeitspaketen

Die Zuordnung zu den Endergebnissen folgt dem Zweck einer Anforderung, die Gruppen des Pflichtenhefts folgen ihrem Gegenstand. Beide Gliederungen decken sich weitgehend, aber nicht überall.

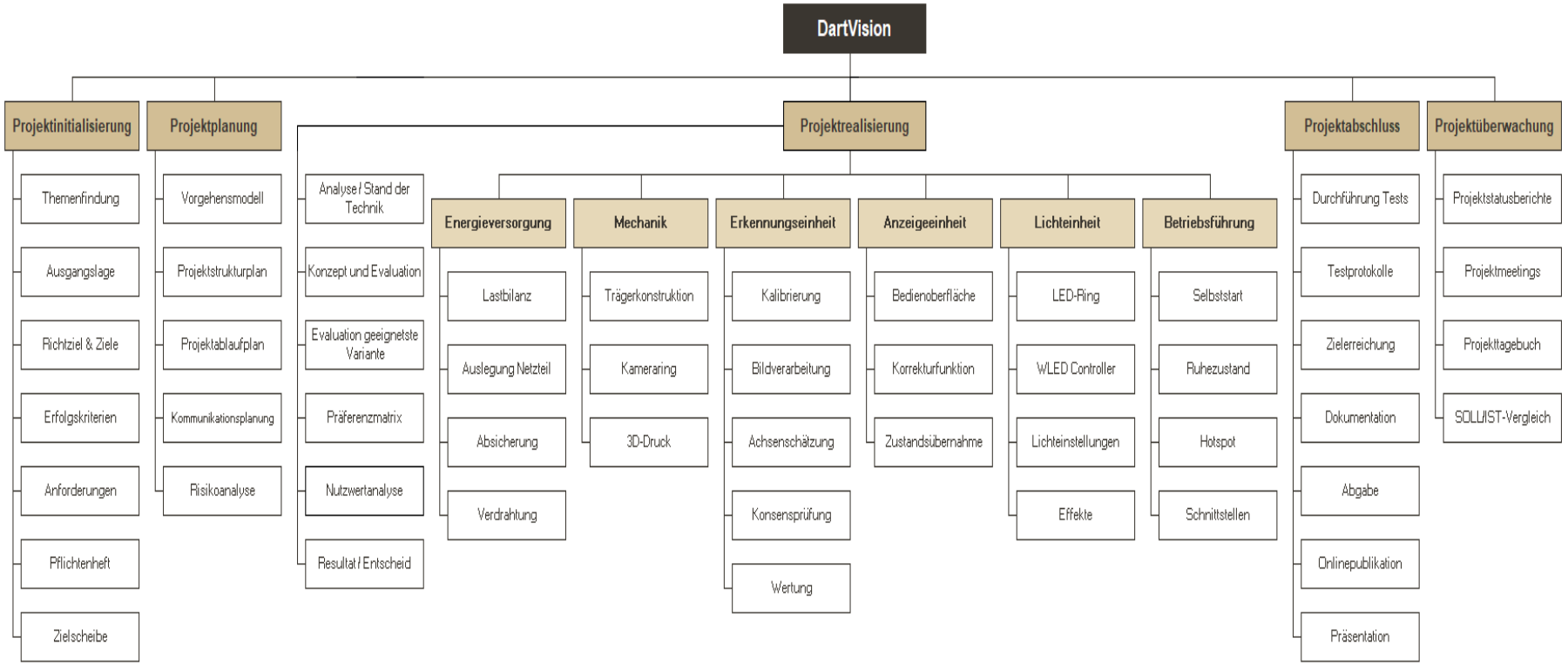
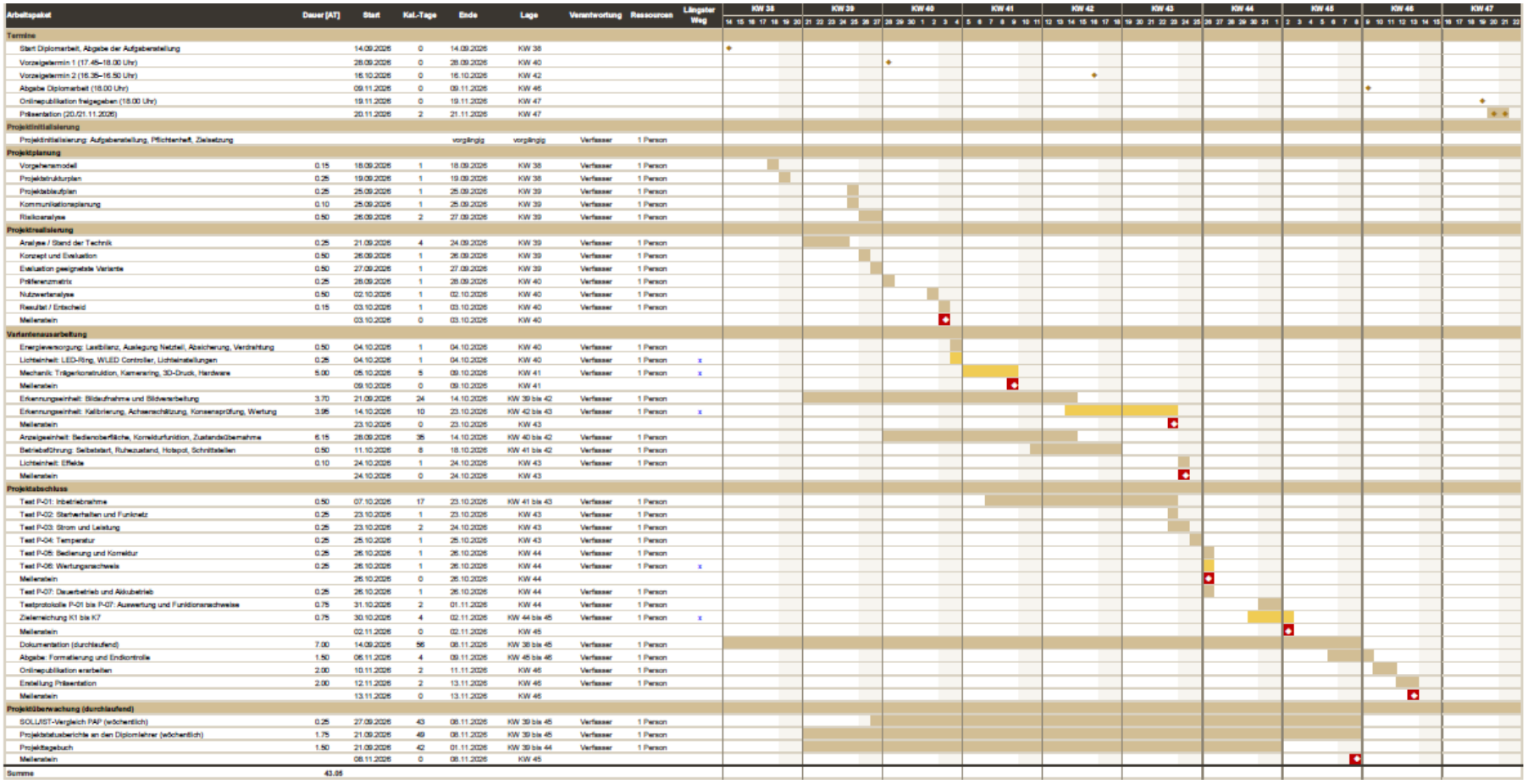


Abbildung 4: Projektstrukturplan

6.3 Projektablaufplanung



Arbeitspaket	Dauer [AT]	Start	Kal.-Tage	Ende	Lage	Verantwortung	Ressourcen	Längster Weg
Termine								
Start Diplomarbeit, Abgabe der Aufgabenstellung		14.09.2026	0	14.09.2026	KW 38			
Vorzeigetermin 1 (17.45–18.00 Uhr)		28.09.2026	0	28.09.2026	KW 40			
Vorzeigetermin 2 (16.35–16.50 Uhr)		16.10.2026	0	16.10.2026	KW 42			
Abgabe Diplomarbeit (18.00 Uhr)		09.11.2026	0	09.11.2026	KW 46			
Onlinepublikation freigegeben (18.00 Uhr)		19.11.2026	0	19.11.2026	KW 47			
Präsentation (20./21.11.2026)		20.11.2026	2	21.11.2026	KW 47			
Projektinitialisierung								
Projektinitialisierung: Aufgabenstellung, Pflichtenheft, Zielsetzung				vorgängig	vorgängig	Verfasser	1 Person	
Projektplanung								
Vorgehensmodell	0.15	18.09.2026	1	18.09.2026	KW 38	Verfasser	1 Person	
Projektstrukturplan	0.25	19.09.2026	1	19.09.2026	KW 38	Verfasser	1 Person	
Projektablaufplan	0.25	25.09.2026	1	25.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Kommunikationsplanung	0.10	25.09.2026	1	25.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Risikoanalyse	0.50	26.09.2026	2	27.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Projektrealisierung								
Analyse / Stand der Technik	0.25	21.09.2026	4	24.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Konzept und Evaluation	0.50	26.09.2026	1	26.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Evaluation geeignetste Variante	0.50	27.09.2026	1	27.09.2026	KW 39	Verfasser	1 Person	
Präferenzmatrix	0.25	28.09.2026	1	28.09.2026	KW 40	Verfasser	1 Person	
Nutzwertanalyse	0.50	02.10.2026	1	02.10.2026	KW 40	Verfasser	1 Person	
Resultat / Entscheid	0.15	03.10.2026	1	03.10.2026	KW 40	Verfasser	1 Person	
Meilenstein		03.10.2026	0	03.10.2026	KW 40			
Variantenausarbeitung								
Energieversorgung: Lastbilanz, Auslegung Netzteil, Absicherung, Verdrahtung	0.50	04.10.2026	1	04.10.2026	KW 40	Verfasser	1 Person	
Lichteinheit: LED-Ring, WLED Controller, Lichteinstellungen	0.25	04.10.2026	1	04.10.2026	KW 40	Verfasser	1 Person	x
Mechanik: Trägerkonstruktion, Kamerarring, 3D-Druck, Hardware	5.00	05.10.2026	5	09.10.2026	KW 41	Verfasser	1 Person	x
Meilenstein		09.10.2026	0	09.10.2026	KW 41			
Erkennungseinheit: Bildaufnahme und Bildverarbeitung	3.70	21.09.2026	24	14.10.2026	KW 39 bis 42	Verfasser	1 Person	
Erkennungseinheit: Kalibrierung, Achsenschätzung, Konsensprüfung, Wertung	3.95	14.10.2026	10	23.10.2026	KW 42 bis 43	Verfasser	1 Person	x
Meilenstein		23.10.2026	0	23.10.2026	KW 43			
Anzeigeeinheit: Bedienoberfläche, Kernelduntuition, Zustandsübernahme	6.15	28.09.2026	35	14.10.2026	KW 40 bis 42	Verfasser	1 Person	
Betriebsführung: Selbsttest, Ruhezustand, Hotspot, Schnittstellen	0.50	11.10.2026	8	18.10.2026	KW 41 bis 42	Verfasser	1 Person	
Lichteinheit: Effekte	0.10	24.10.2026	1	24.10.2026	KW 43	Verfasser	1 Person	
Meilenstein		24.10.2026	0	24.10.2026	KW 43			
Projektabschluss								
Test P-01: Inbetriebnahme	0.50	07.10.2026	17	23.10.2026	KW 41 bis 43	Verfasser	1 Person	
Test P-02: Startverhalten und Funknetz	0.25	23.10.2026	1	23.10.2026	KW 43	Verfasser	1 Person	
Test P-03: Strom und Leistung	0.25	23.10.2026	2	24.10.2026	KW 43	Verfasser	1 Person	
Test P-04: Temperatur	0.25	25.10.2026	1	25.10.2026	KW 43	Verfasser	1 Person	
Test P-05: Bedienung und Korrektur	0.25	26.10.2026	1	26.10.2026	KW 44	Verfasser	1 Person	
Test P-06: Wertungsnachweis	0.25	26.10.2026	1	26.10.2026	KW 44	Verfasser	1 Person	x
Meilenstein		26.10.2026	0	26.10.2026	KW 44			
Test P-07: Dauerbetrieb und Akkubetrieb	0.25	26.10.2026	1	26.10.2026	KW 44	Verfasser	1 Person	
Testprotokolle P-01 bis P-07: Auswertung und Funktionsnachweise	0.75	31.10.2026	2	01.11.2026	KW 44	Verfasser	1 Person	
Zielerreichung K1 bis K7	0.75	30.10.2026	4	02.11.2026	KW 44 bis 45	Verfasser	1 Person	x
Meilenstein		02.11.2026	0	02.11.2026	KW 45			
Dokumentation (durchlaufend)	7.00	14.09.2026	56	08.11.2026	KW 38 bis 45	Verfasser	1 Person	
Abgabe: Formatierung und Endkontrolle	1.50	06.11.2026	4	09.11.2026	KW 45 bis 46	Verfasser	1 Person	
Onlinepublikation erarbeiten	2.00	10.11.2026	2	11.11.2026	KW 46	Verfasser	1 Person	
Erstellung Präsentation	2.00	12.11.2026	2	13.11.2026	KW 46	Verfasser	1 Person	
Meilenstein		13.11.2026	0	13.11.2026	KW 46			
Projektüberwachung (durchlaufend)								
SOLL/IST-Vergleich PAP (wöchentlich)	0.25	27.09.2026	43	08.11.2026	KW 39 bis 45	Verfasser	1 Person	
Projektstatusberichte an den Diplomlehrer (wöchentlich)	1.75	21.09.2026	49	08.11.2026	KW 39 bis 45	Verfasser	1 Person	
Projekttagebuch	1.50	21.09.2026	42	01.11.2026	KW 39 bis 44	Verfasser	1 Person	
Meilenstein		08.11.2026	0	08.11.2026	KW 45			
Summe	43.05							

Abbildung 5: Projektablaufplan

Der Ablaufplan ordnet die Arbeitspakete in der Zeit: Dauer, Termine, Meilensteine. Gelb markiert ist der längste Weg von der Mechanik bis zum Wertungsnachweis. Dort verschiebt jede Verzögerung den Endtermin. Unabhängige Pakete liefen parallel: Bildverarbeitung und Anzeige starteten vor dem mechanischen Aufbau.

6.4 Kommunikationsplanung

Projekttitel	DartVision	Verfasser	Timo Meier

Anspruchsgruppe / Anlass	Themen / Inhalte	Periodizität / Zeit	Termin / von	bis	Kanal / Gefäss	Verantwortung	Aufwand [h]
Diplomlehrer							
Projektstatusbericht	· Gesamtbeurteilung und Tendenz · aktueller Projektstand · geplante nächste Schritte · getroffene Massnahmen	Wöchentlich (immer bis Sonntag, 22.00 Uhr)	21.09.2026	08.11.2026	Projektstatusbericht per Mail	Verfasser	0.25
Vorzeigetermin 1	· Ziele und Erfolgskriterien · Projektstruktur- und Ablaufplan · Fragen und Verschiedenes	einmalig, 17.45–18.00 Uhr	28.09.2026	28.09.2026	Microsoft TEAMS	Verfasser	0.5
Vorzeigetermin 2	· Fragen und Verschiedenes · Standortbestimmung · Aufbau/Struktur Dokumentation	einmalig, 16.35–16.50 Uhr	16.10.2026	16.10.2026	Microsoft TEAMS	Verfasser	0.5
Abgabe Diplomarbeit	· Dokumentation · Testprotokolle und Zielerreichung	einmalig, bis 18.00 Uhr	09.11.2026	09.11.2026	Abgabe der Dokumentation	Verfasser	N.A
Verfasser (Projektteam)							
Projekttagebuch	· Entwicklung und Probleme · Lösungen und Entscheide · nächste Schritte	laufend	28.09.2026	08.11.2026	Projekttagebuch	Verfasser	N.A
SOLL/IST-Vergleich	· Arbeitspakete gegen Ablaufplan · Puffer und Auslastung · Tendenz	wöchentlich, mit dem Statusbericht	21.09.2026	08.11.2026	Projektablaufplan	Verfasser	0.25
Schule und Öffentlichkeit							
Fachgespräch	· Aufgabenstellung · Vorgehen und Planung	nach Plan des Abteilungsvorstands	09.09.2026		Gespräch vor Ort	Verfasser	0.5
Onlinepublikation	· Kurzfassung der Arbeit · Ergebnisse	einmalig, freigegeben bis 18.00 Uhr	19.11.2026		Onlineplattform der Schule	Verfasser	8
Präsentationen	· Ergebnis und Vorführung · Fragen der Experten	einmalig	20.11.2026		Präsentation vor Ort	Verfasser	0.5

Tabelle 13: Kommunikationsplanung

6.5 Risikoanalyse

ID	Risiko	Beschreibung	Wahrschein-lichkeit	Auswirkung	Eintrittsindikatoren	Worst-Case-Szenario	Stufe W	Stufe A	Risiko-zahl	Bereich
R1	**Bauteil nicht recht-zeitig lieferbar**	Netzteil, Kameras, Display und Kleinteile sind zuzukau-fen; der Aufbau ist als ein zusammenhängendes Ar-beitspaket geplant	möglich	hoch	Lieferfrist auf der Händler-seite länger als angegeben. Bestätigung bleibt aus. Artikel wird als nicht lagernd geführt.	Die Aufbauwoche ver-streicht ohne Aufbau alle daran hängenden Arbeitspakete ver-schieben sich	2	3	6	**mittel**
R2	**Der Aufbau sprengt die eine zusammen-hängende Woche**	Zuschnitt, Lackieren, Mon-tage und Verdrahtung ha-ben Wartezeiten und lassen sich nicht in Abendstunden zerlegen	möglich	hoch	Ein Teilschritt zieht sich über zwei Tage. ein Druckteil passt beim Zu-sammenbau nicht. Nacharbeit an der Träger-platte.	Der Aufbau ist am Ende der Woche nicht betriebsbereit. die Erkennung wird an einem wandernden Gegenstand entwi-ckelt.	2	3	6	**mittel**
R3	**Fehlendes Vorwis-sen kostet mehr Zeit als geplant**	Vorwissen zu Bildverarbei-tung, nebenläufige Program-mierung und Oberflächen-bau sind bei Beginn nicht vorhanden.	wahrschein-lich	hoch	Ein Arbeitspaket überzieht seine Dauer um mehr als die Hälfte. dieselbe Frage kehrt in meh-reren Teilschritten wieder.	Der Plan trägt nicht bis zur Abgabe.	3	3	9	**hoch**
R4	**Ausfall von Arbeits-zeit**	Die Kapazität besteht aus Abenden, Wochenenden und Ferien; eine Woche Ausfall ist nicht aufholbar	möglich	hoch	Krankheit. berufliche Belastung über der Annahme. ein Wochenende fällt aus.	Eine ganze Kalender-woche entfällt. der Puffer ist aufge-braucht.	2	3	6	**mittel**
R5	**Ein Muss-Erfolgskri-terium wird nicht er-reicht**	K2 verlangt 80 Prozent rich-tige Zuordnung. Das dafür nötige Wissen ist bei Beginn nicht vorhanden	möglich	sehr hoch	Kalibrierung zu ungenau. Erkennung funktioniert nicht zuverlässig.	Die Arbeit erreicht ein Muss-Kriterium nicht der Nachweis bleibt of-fen	2	4	8	**hoch**
R6	**Messmittel fehlen oder genügen nicht**	A20 und A24 verlangen eine belegte Lastbilanz; Strom, Spannung und Temperatur sind zu messen	unwahr-scheinlich	mittel	Kein Strommessgerät für den erwarteten Bereich keine Temperaturmessung am Netzteil möglich	Die Auslegung bleibt gerechnet statt belegt ein Nachweis fällt auf eine Schätzung zurück	1	2	2	**niedrig**

R7	**Die Dokumentation bleibt hinter dem Aufbau zurück**	K7 verlangt eine Dokumentation, die den Nachbau ermöglicht; sie entsteht neben der Entwicklung	wahrscheinlich	hoch	Ein Kapitel wartet auf Zahlen. Entscheide sind nur im Ergebnis ablesbar.	Die Dokumentation wird am Schluss rekonstruiert K7 ist nicht nachweisbar	3	3	9	**hoch**
R8	**Ein Rückschritt in der Software ist nicht rückbaubar**	Mehrere Programmteile entstehen parallel; ein lauffähiger Stand muss wiederherstellbar bleiben	möglich	mittel	Eine Änderung verschlechtert ein Verhalten, das vorher ging der vorige Stand ist nicht mehr auffindbar	Ein funktionierender Stand geht verloren die Arbeit beginnt an diesem Punkt von vorn	2	2	4	**mittel**
R9	**Ein Bauteil ist fehlerhaft oder passt nicht**	Gekaufte und selbst gefertigte Teile treffen erst beim Zusammenbau aufeinander	möglich	mittel	Ein Druckteil hat Untermass· ein Kabel hat den falschen Steckertyp· eine Kamera meldet sich nicht an	· Ein Teil muss neu beschafft oder neu gedruckt werden· der Aufbau steht still	2	2	4	**mittel**

Tabelle 14: Risikoanalyse Projektplanung

Wahrscheinlichkeit	Stufe
unmöglich	0
unwahrscheinlich	1
möglich	2
wahrscheinlich	3

Auswirkung	Stufe
gering	1
mittel	2
hoch	3
sehr hoch	4

Bereich	ab Risikozahl
hoch	8
mittel	4
niedrig	bis 3

6.5.1 16er Matrix vor Präventionsstrategie

Auswirkung		Gering	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Wahrscheinlichkeit	Wahrscheinlich			R3: Fehlendes Vorwissen R7: Dokumentation	
	Möglich		R8: Software R9: Bauteil	R1: Bauteil R2: Aufbau R4: Ausfall	R5: Erfolgskriterium
	Unwahrscheinlich		R6: Messmittel		
	Unmöglich				

Bereiche: hoch ab Risikozahl 8 · mittel 4 bis 7 · niedrig bis 3 (Risikozahl = Stufe W × Stufe A, siehe Blatt Risikoanalyse)

Tabelle 15: 16er Matrix vor Präventionsstrategie

6.5.2 Präventionsstrategie

ID	Risiko	Massnahmen
R1	Bauteil nicht rechtzeitig lieferbar	Bestellung vor der Aufbauwoche. Lieferfristen vor der Bestellung prüfen und die Lieferbarkeit als Ausschlusskriterium der Evaluation führen.
R2	Der Aufbau sprengt die Woche	Alles vorfertigen, was ohne den Aufbau geht. Die Druckteile entstehen unabhängig. die dritte Ferienwoche bleibt unverplant.
R3	Fehlendes Vorwissen kostet Zeit	Bewährtes übernehmen statt neu entwerfen. Die Erkennung an einem früh fertigen, stabilen Aufbau entwickeln.
R4	Ausfall von Arbeitszeit	4,25 Tage Puffer bleiben unverplant, die dritte Ferienwoche ebenfalls; wöchentlicher SOLL/IST-Abgleich.
R5	Ein Muss-Erfolgskriterium wird nicht erreicht	Die Erfolgskriterien früh in messbare Grössen übersetzen. Zwischenmessungen vor dem Messtag.
R6	Messmittel fehlen oder genügen nicht	Messmittel je Messgrösse vor dem Messtag festlegen und prüfen.
R7	Die Dokumentation bleibt zurück	Die Dokumentation über alle Wochen verteilen statt an den Schluss legen. Die letzte Woche trägt keine Entwicklung mehr.
R8	Ein Rückschritt ist nicht rückbaubar	Versionsverwaltung von Beginn an. Jeder lauffähige Stand wird festgeschrieben, bevor der nächste beginnt.
R9	Ein Bauteil ist fehlerhaft oder passt nicht	Bestellung vor der Aufbauwoche. Lieferfristen vor der Bestellung prüfen.

Tabelle 16: Präventionsstrategie

6.5.3 16er Matrix nach Präventionsstrategie

Wahrscheinlichkeit	Auswirkung: Gering	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Wahrscheinlich				
Möglich	R9: Bauteil	R4: Ausfall	R3: Fehlendes Vorwissen R7: Dokumentation	R5: Erfolgskriterium
Unwahrscheinlich	R6: Messmittel R8: Software		R1: Bauteil R2: Aufbau	
Unmöglich				

Bereiche: hoch ab Risikozahl 8 · mittel 4 bis 7 · niedrig bis 3 (Bewertung nach der Prävention, siehe Blatt Präventionsstrategie; gleiche Skalen wie Blatt Risikoanalyse)

Tabelle 17: 16er Matrix nach Präventionsstrategie

Bewertung:

Nach der Präventionsstrategie liegen von neun Risiken fünf im niedrigen Bereich, drei im mittleren und eines im hohen. Die Verschiebung gegenüber der ursprünglichen Bewertung zeigt, was die Massnahmen leisten: Beschaffung, Aufbau, Messmittel und Software sind so weit abgesichert, dass sie den Verlauf nicht mehr bestimmen.

Nicht jedes Risiko lässt sich jedoch im Voraus entschärfen. R3 und R7 bleiben im mittleren Bereich, weil sie nicht von einer einzelnen Massnahme abhängen, sondern von durchgehender Arbeit über die ganze Dauer. R5 bleibt im hohen Bereich, weil es sich einer vorbeugenden Massnahme entzieht. Ob ein Erfolgskriterium erreicht wird, entscheidet sich erst an der Messung und keine Planung nimmt diese Entscheidung vorweg.

Wirksam ist dort allein, den Zeitpunkt nach vorne zu ziehen. Deshalb steht der Prüfplan vor der ersten Messung und die Zwischenmessungen werden vorgängig geführt. Verfehlt ein Kriterium seinen Sollwert, bleibt damit Zeit, nachzubessern.

7 Projektrealisierung

7.1 Analyse und Stand der Technik

Einleitung

Aus der Idee eines automatisch auswertenden Dartsystems wurden zuerst sieben Endergebnisse und daraus 25 Anforderungen sowie sieben Erfolgskriterien abgeleitet. Entscheidend war, jede Anforderung so zu formulieren, dass sie später überprüft werden kann. Dazu wurde bereits im Pflichtenheft festgelegt, ob der Nachweis durch Test, Vorführung oder Sichtprüfung erfolgt.

Abweichung zum Pflichtenheft: Da die Präsentationszeit beschränkt ist, werden alle Nachweise vorgängig mit Tests überprüft, um am Abgabetermin eine vollständige Zielauswertung vorliegen zu haben.

Stand der Technik

Bestehende kamerabasierte Dartsysteme arbeiten nach einem ähnlichen Grundprinzip. Drei Kameras erfassen die Darts aus verschiedenen Blickrichtungen, eine ringförmige Beleuchtung reduziert Schatten und das Programm läuft auf einem Server. Die Kameras können an einen Laptop oder ein Mikrocomputer angeschlossen werden.

Für den mechanischen Aufbau benötigt es eine Gesamthalterung für alle Komponenten. Ständer und Dartboard sind bei verschiedenen Lieferanten verfügbar. Für die Kamera-LED-Halterung bestehen bereits bewährte Lösungen und zum Teil frei verfügbare 3D-Druckdaten.

Abgrenzung des eigenen Systems

Der wesentliche Unterschied zu bestehenden Lösungen liegt im autarken Betrieb und den Lichteffekten. DartVision benötigt weder Benutzerkonto noch Internetverbindung. Das System baut ein eigenes Funknetz auf, über das Erkennung, Anzeige und Lichtsteuerung miteinander kommunizieren.

Damit bleibt das System unabhängig von fremder Infrastruktur und kann auch dort betrieben werden, wo keine Internetverbindung vorhanden ist. Diese Vorgabe beeinflusst wesentlich die Wahl der Rechnerplattform, das Netzwerkkonzept und die Softwarearchitektur. Die Lichteffekte geben der Anlage eine zweite Rückmeldung neben der Anzeige.

7.2 Konzept und Evaluation

Für DartVision wurden keine vollständigen Gesamtkonzepte gegenübergestellt. Das System besteht aus mehreren Teilbereichen, für die jeweils eigene Varianten geprüft wurden. Zum Beispiel bei Rechnerplattform, Beleuchtung, Energieversorgung und Programmiersprache. Ein Gesamtentwurf ergibt sich erst aus der Kombination dieser Einzelentscheide.

Welche Komponenten auszuwählen sind, gibt das Pflichtenheft vor. A21 verlangt für Mikrocomputer, Kameras, Display, LED-Controller und Netzteil eine dokumentierte Evaluation gegen die Anforderungen. Diese Liste bestimmt den Umfang der Evaluation. Dazu kommen die Softwareentscheide, ohne die sich das System nicht umsetzen lässt.

Die verglichenen Kandidaten, wurden durch eigene Recherche und mit Unterstützung eines KI-Werkzeugs zusammengetragen und gegen Datenblätter und Herstellerangaben geprüft.

Die Varianten werden nach den einzelnen Komponenten und Funktionen geordnet. Die Reihenfolge richtet sich nach den technischen Abhängigkeiten: Entscheidungen, die Randbedingungen für weitere Schritte festlegen, werden zuerst behandelt. Dabei werden zunächst die Hardware und danach die Software betrachtet. Wie tief eine Komponente betrachtet wird, richtet sich danach, ob gleichwertige Varianten zur Wahl standen. Welche Gegenstände mit einer Nutzwertanalyse bewertet werden und welche nicht, hält Kapitel 7.3 fest.

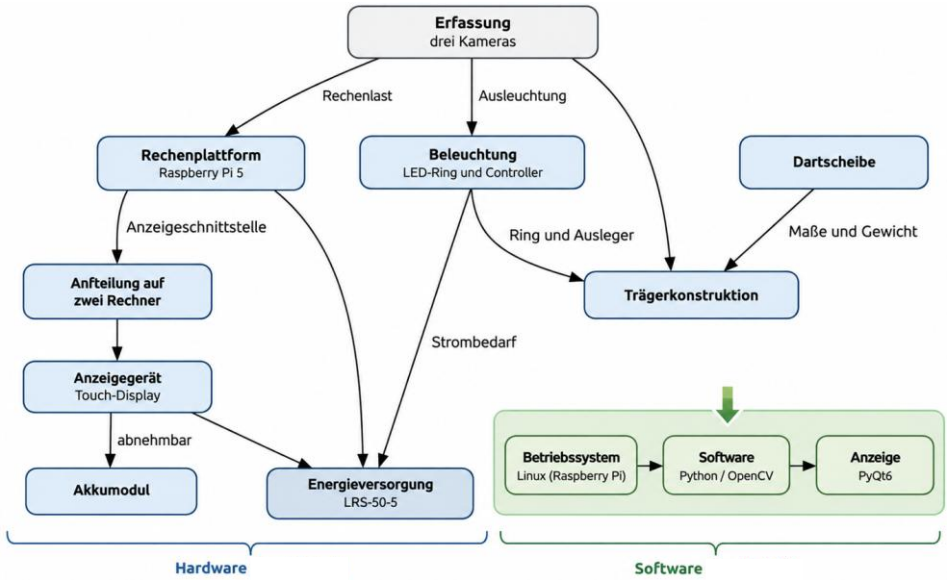


Abbildung 6: Übersicht Hardware / Software

Evaluation Teil A – Die Hardware

7.2.1 Erfassung: Kameras, Anordnung, Auflösung und Bildformat

Bestehende Aufbauten verwenden drei um 120° versetzte Kameras. Mehrere Blickrichtungen sind nötig, weil ein Dart aus einer einzelnen Perspektive seine Spitze verdecken kann. Wichtig sind deshalb eine feste Montage und eine reproduzierbare Ausrichtung, da Verschiebungen die Kalibrierung beeinflussen.
Für das Kameramodul wurden nicht verschiedene Modellvariation verglichen. Verwendet wird die in bestehenden Aufbauten verbreitete USB-Kameraklasse mit OV9732-Sensor, 1280 × 720 Pixel und rund 100° Bildwinkel. Der Bildwinkel muss bei 42,5 cm Abstand die vollständige Dartscheibe erfassen.
Alle drei Kameras sollen am Rechner ihren eigenen USB-Anschluss erhalten, um die Auswertung und den Aufbau zu vereinfachen.

7.2.2 Rechenplattform

Die Rechenplattform muss drei Kamerabilder gleichzeitig einlesen und Bildverarbeitung, Kalibrierung und Wertung ausführen. Betrachtet wurden drei Einplatinenrechner. Der Orange Pi5 Plus und die beiden Raspberry Pi4 und Pi5. Alle in der 8GB Ausführung.
Besonders beachtet werden Baugrösse, Leistungsreserve sowie Treiber- und Softwareunterstützung. Die Baugrösse wirkt dabei als feste Randbedingung, weil der Rechner in das vorgesehene Gehäuse passen muss. Als Betriebssystem ist das offizielle System der Rechnerfamilie vorgesehen.

7.2.3 Anzeigerechner

Ausgangspunkt war ein einzelner Rechner mit direkt angeschlossenem Display. Für einen Wechsel zu einem abnehmbaren und mobilen Anzeigeteil wurden weitere Möglichkeiten betrachtet.
Bei diesem Teil sind vor allem die Anzeigeschnittstelle, die Kompatibilität zum Touch-Display, die Funkverbindung und die Versorgung des abnehmbaren Anzeigeteils relevant. Anhand der Kriterien werden die drei Microcomputer Raspberry Pi3 B+, Pi Zero 2 W und der Arduino Mego 2560 näher betrachtet.

7.2.4 Anzeigegerät

Für die Spielanzeige wurde zunächst die notwendige Grösse und Lesbarkeit betrachtet. Entscheidend waren eine ausreichend grosse Zwei-Spieler-Darstellung, Touchfähigkeit und eine möglichst sichere Kompatibilität mit dem Raspberry Pi 3 B+.
Entscheid: Raspberry Pi Touch Display 2 (7''). Für die Zwei-Spieler-Anzeige wurde Querformat gewählt.
Begründung: Ein Display aus dem Raspberry-Pi-Ökosystem reduzierte das Kompatibilitäts- und Treiberrisiko.

Hinweis: Entscheid fiel nach der Auswahl des Anzeigerechners (Raspberry Pi 3 B+).

7.2.5 Akkumodul des Anzeigerechners

Der Gegenstand besteht nur, wenn der Anzeigeteil abnehmbar ist: Dann braucht er eine Versorgung, die er mitnimmt. A20 und A24 gelten auch für ihn. Geachtet wird auf möglichst kompakte Integration am Rechner und einen Wechsel zwischen Netz- und Akkubetrieb ohne Bedienaufwand.

Kandidat	Eigenschaft
aufsteckbares Akkumodul für die Rechnerfamilie	sitzt direkt am Rechner. Datenschnittstelle mit Abfrage des Ladezustands
externe USB-Powerbank	eigenständiges Gerät, zusätzliches Gehäuseteil und ein Kabel mehr

Tabelle 18: Kandidaten Akkumodul

Entscheid: PiSugar 3 Plus.
Begründung: Das Modul wird unmittelbar auf den Anzeigerechner gesteckt und braucht weder ein zusätzliches Gehäuseteil noch ein weiteres Kabel. Der Anzeigeteil bleibt damit so kompakt, wie es seine Abnehmbarkeit verlangt. Über die Datenschnittstelle lässt sich der Ladezustand abfragen, sodass der Wechsel zwischen Netz- und Akkubetrieb nachvollziehbar bleibt. Die Versorgung nach A20 und A24 bleibt erhalten: Im Netzbetrieb lädt das Modul über die Ladezuleitung der Anzeigeeinheit.

Hinweis: Der Entscheid fiel nach der Auswahl des Anzeigerechners (Raspberry Pi 3 B+).

7.2.6 Beleuchtung und Ansteuerung

Beleuchtung: Für die Auswahl der Beleuchtung müssen neben Strombedarf und Ausleuchtung auch die benötigten Farben berücksichtigt werden. Der LED-Ring muss Weiss, Grün und Rot darstellen können, da Weiss für die Kamerabeleuchtung und Grün beziehungsweise Rot für definierte Spielereignisse vorgesehen sind.

Kriterium	Weshalb
Spannungsebenen	Sicherstellen, dass kein zusätzliches Netzteil benötigt wird
Strom bei Vollweiss	Auswirkung auf Netzteil
Helligkeit im Spielbetrieb	Ist Helligkeit genügend, um Anforderungen zu bestehen.
Farbdarstellung	Vollweiss, Grün und Rot müssen dargestellt werden können

Tabelle 19: Kriterien Beleuchtung

Ansteuerung: Für die Ansteuerung des LED-Streifen wurden verschiedene Varianten betrachtet. Nachstehend die Kriterien, welche bei der Auswahl berücksichtigt wurden:

Kriterium	Weshalb
Unterstützung im gewählten Rechner	Muss vom gewählten Hauptrechner angesteuert werden können
Lieferbarkeit	Ausschlusskriterium
Datenpegel	der Streifen verlangt einen Pegel.
Rückwirkung auf den Hauptrechner	Zeitverhalten der Ansteuerung darf die Bildverarbeitung nicht belasten
Länge der Datenleitung	Leitungsführung vom ESP32 zum Ring

Tabelle 20: Kriterien Ansteuerung

Auswahl Produkte:

Gegenstand LED-Streifen	Kandidat
Spannungsebene	Leuchtdioden für 5 V oder 12V
Bestückungsdichte	30 LED/m, rund 4,1 A bei weisser Vollaussteuerung · 60 LED/m, rund das Doppelte; beide lieferbar

Gegenstand Ansteuerung	Kandidat
Funk-Controller	fertiger Funk-Controller (ESP32) mit quelloffener Beleuchtungssoftware, angesteuert über das Netz
Hauptrechner, Anschlussleiste	der Hauptrechner steuert den Streifen unmittelbar über seine Anschlussleiste, mit externem Pegelwandler
Hauptrechner, serielle Schnittstelle	der Hauptrechner steuert den Streifen über eine serielle Schnittstelle
kleinere Funkplatine	kleinere Funkplatine anstelle des Controllers; kein Pegelwandler an Bord, knapper Speicher

Tabelle 21: Kandidaten Beleuchtung & Ansteuerung

Spannungsebene des LED-Streifens: Gewählt wird ein Streifen mit einzeln ansteuerbaren WS2812B-Leuchtdioden für 5 V und 30 Leuchtdioden je Meter, der BTF-5V-30L-W. Ein Streifen für 12 V zieht bei gleicher Leistung weniger Strom und hat über die Ringlänge weniger Spannungsabfall, verlangt aber eine zweite Spannungsebene und damit einen Wandler oder ein zweites Netzteil. Beides widerspricht A20. Die kleinere Bestückungsdichte genügt für die Ausleuchtung und zieht bei weisser Vollaussteuerung rund 4,1 A. Die doppelte Dichte würde diesen Strom verdoppeln. Dieser Entscheid wird nicht mit einer Nutzwertanalyse geführt, weil ihn die Randbedingung einer gemeinsamen Spannungsebene bereits bestimmt. Er legt die Spannungsebene der ganzen Anlage auf 5 V fest und ist damit die Grundlage für die Energieversorgung in 7.2.7

7.2.7 Energieversorgung

Die Energieversorgung hängt direkt vom Strombedarf und von den verwendeten Spannungsebenen ab. Beide stehen mit den vorangehenden Entscheiden fest: Die Rechner aus 7.2.2 und 7.2.3 werden mit 5 V betrieben und der in 7.2.6 gewählte Streifen mit 30 Leuchtdioden je Meter ebenfalls. Die ganze Anlage läuft damit auf einer einzigen Spannungsebene und für die Energieversorgung bleiben Strom und Reserve zu bestimmen. Vor der eigentlichen Auswahl des Netzteils wurde deshalb zuerst eine überschlägige Stromberechnung durchgeführt. Damit liess sich früh abschätzen, in welcher Grössenordnung der Gesamtstrom

der Anlage liegen wird und welche Reserve das Netzteil benötigt. Der vollständige Rechenweg ist im Anhang dokumentiert.
Zu beachten sind neben der Stromreserve auch Baugrösse, Wärmeentwicklung und eine möglichst robuste Versorgung.

A20 verlangt ein zentrales Netzteil mit einem einzigen Netzanschluss. Wie diese Versorgung aufzubauen ist, hing von der Spannungsebene der Beleuchtung ab. Betrachtet wurden drei Aufbauten.

Architektur	Kandidat
ein Netzteil mit Wandler	ein Netzteil für die Beleuchtung, ein Wandler erzeugt die Rechnerspannung
zwei Netzteile	je ein Netzteil für Beleuchtung und Rechner hinter einem gemeinsamen Netzeingang
ein Netzteil 5 V	nur möglich, wenn Beleuchtung und Rechner dieselbe Spannung haben

Tabelle 22: Architektur der Energieversorgung

Die ersten beiden Aufbauten sind nur nötig, wenn Beleuchtung und Rechner auf verschiedenen Spannungen laufen. Zwei Netzteile scheiden darüber hinaus an A20 aus. Mit dem in 7.2.6 gewählten Streifen für 5 V entfallen Wandler und zweites Gerät. Es bleibt das einzelne Netzteil für 5 V und zu wählen ist nur noch dessen Baugrösse, Leistung und die Kosten.

Kriterium	Eigenschaft
Deckung der berechneten Last	Nennstrom gegen Lastbilanz
Bauraum im Gehäuse	passt das Gerät ohne Anpassung des Gehäuses
Auslastung im Höchstfall	Reserve bei weisser Vollaussteuerung
Kosten	Beschaffungspreis

Tabelle 23: Kriterien Netzteil

Gesetzt ist ein Industrie-Schaltnetzteil mit Schutzklasse und Schraubklemmen aus einer Baureihe, die als zuverlässig gilt und ab Lager verfügbar ist (Mean Well LRS). Ein Vergleich mit anderen Baureihen fand nicht statt.

Kandidat	Eigenschaft
LRS-50-5	kompaktere Ausführung, 10 A
LRS-100-5	grössere Ausführung derselben Baureihe

Tabelle 24: Kandidaten Netzteil

7.2.8 Dartscheibe

Für DartVision wird eine Steeldart-Dartscheibe verwendet, die den üblichen Wettbewerbsanforderungen entspricht. Eine elektronische Dartscheibe kommt nicht infrage, da das System ausdrücklich für Steeldart ausgelegt ist.
Die bereits vorhandene Dartscheibe erfüllt die Anforderungen und wurde deshalb nicht mit anderen Modellen verglichen. Ihre Abmessungen bilden feste Randbedingungen für den weiteren Aufbau.

7.2.9 Trägerkonstruktion

Für die Trägerkonstruktion wurden vorhandene, veröffentlichte und selbst gefertigte Teile berücksichtigt. Kameraring, Kamerahalterungen, LED-Aufnahme und Ausleger liegen als veröffentlichte Druckdaten für diesen Einsatzzweck vor. Verwendet wird der Satz «OMMO Dartboard ring» des Urhebers OMMO, veröffentlicht auf der Plattform MakerWorld; die vollständige Angabe mit Lizenz steht im Quellenverzeichnis.

Bereich	Entscheid
Ring und Kamerahalterung	Übernahme einer bestehenden Konstruktion mit fest vorgegebener Kameraposition.
Aufbaugebundene Teile	Eigene Konstruktion für Abdeckungen und Halterungen, die von den konkret verbauten Komponenten abhängen.
Ständer und Trägerplatte	Trägerplatte Holz roh. Zuschneiden und lackieren. Ständer soll Einkaufsteil sein (wird nur für Präsentation verwendet).

Tabelle 25: Trägerkonstruktion

Evaluation Teil B – Software

7.2.10 Programmiersprache

Für die Programmiersprache wurden drei Möglichkeiten betrachtet. Relevant sind Entwicklungsaufwand, Kenntnisse, Bibliotheksunterstützung und Eignung für die eingesetzte Rechnerplattform.

Variante	Eigenschaften / zu beachten
Python	Vollständige OpenCV-Anbindung, im Unterricht verwendet und erste Kenntnisse vorhanden.
C++	Höhere Ausführungsgeschwindigkeit des eigenen Codes, deutlich höherer Entwicklungsaufwand, Kenntnisse begrenzt vorhanden.
C#	Mittlerer Entwicklungsaufwand; Bibliotheksanbindung vorhanden. Keine Berührungspunkte.

Tabelle 26: Programmiersprache

7.2.11 Bildverarbeitungsbibliothek

Für die Bildverarbeitung wurden drei Bibliotheken anhand von Echtzeitfähigkeit, Kalibrierung, Konturverfahren, Verbreitung auf der Rechnerplattform und Abdeckung des benötigten Arbeitsablaufs betrachtet.

Bildverarbeitungsbibliothek	Kurzbeschreibung
OpenCV	Umfangreiche Bibliothek für Bildverarbeitung mit Funktionen für Kamerabilder, Kalibrierung, Konturen und geometrische Auswertung.
scikit-image	Python-Bibliothek für Bildverarbeitung und Bildanalyse mit vielen fertigen Algorithmen, jedoch weniger auf Echtzeit-Kameraverarbeitung ausgerichtet.
SimpleCV	Einfach aufgebaute Bildverarbeitungsbibliothek mit leicht zugänglichen Funktionen, aber deutlich kleinerem Funktionsumfang und geringerer Aktualität.

Tabelle 27: Bildverarbeitungsbibliothek

Nicht als eigener Gegenstand bewertet, wurde NumPy. Die Bibliothek ist kein Wahlentscheid, sondern die Rechengrundlage, auf der OpenCV in Python aufsetzt. Jedes Kamerabild ist ein NumPy-Feld und OpenCV gibt nichts anderes zurück. Ein Vergleich gegen Alternativen wäre deshalb gegenstandslos gewesen.

7.2.12 Oberflächenwerkzeug

Für die Bedienoberfläche wurden drei Werkzeuge betrachtet. Wichtig sind Vollbildbetrieb, Touch-Bedienung, die Gestaltung samt der Möglichkeit, Schriftgrössen passend zur geforderten Ablesbarkeit zu bestimmen, und die verfügbaren Lernunterlagen, weil das Werkzeug im Bildungsgang nicht vorkam.

Variante	Eigenschaften / zu beachten
PyQt6	Ausgereifte Bedienelemente; Vollbild und Touch; Schriftmasse können abgefragt werden.
Kivy	Grafikbeschleunigte Oberfläche; auf Mehrfingerbedienung ausgelegt.
Tkinter	Einfach und bereits enthalten; eingeschränkter bei Gestaltung und Skalierung.

Tabelle 28: Oberflächenwerkzeug

Eine Weboberfläche würde zusätzlich HTML, Stilvorlagen und eine Skriptsprache benötigen, obwohl die Anzeige auf einem einzelnen Gerät im Vollbild läuft. Wird für Prototyp 02 in Betracht gezogen.
Der Entscheid fällt in Phase 5, wo die Bedienoberfläche entsteht. Dort steht auch die Begründung der Auswahl.

7.2.13 Übertragungsweg zwischen den Rechnern

Durch die Aufteilung auf zwei Rechner müssen Spieldaten zwischen Haupt- und Anzeigerechner übertragen werden. Kamerabilder werden nicht übertragen. Beide Anwendungen laufen im selben Netz und sind in derselben Sprache geschrieben. Eine Direktverbindung genügt deshalb, und ein Vermittlungsdienst, der gestartet und überwacht werden müsste, entfällt. Offen bleiben zwei Fragen.

Offene Frage	Möglichkeit	Worauf es ankommt
In welchem Format wird übertragen?	Textformat · Binärformat	Text lässt sich mit einfachen Mitteln mitlesen und trägt damit die Störungssuche zwischen zwei Geräten; binär ist kompakter, verlangt dafür eine eigene Auswertung
Was enthält eine Nachricht?	vollständiger Spielzustand · Änderungsmeldungen	A8 verlangt, dass die Anzeige nach einem Unterbruch mit der ersten Nachricht wieder stimmt; Änderungsmeldungen sind sparsamer, verlangen aber eine Wiederherstellung des Zustands

Tabelle 29: Übertragungsweg Rechner

Beide Fragen werden in Phase 6 entschieden: der Weg der Verbindung in deren Recherche, der Inhalt einer Nachricht beim Tragfähig machen der Übertragung.

7.2.14 Betriebsart des Netzes

Für die Verbindung der Teilsysteme wurde lediglich eine Betriebsart betrachtet. A17 fordert ein eigenes Funknetz. K6 prüft den Betrieb ohne Heimnetz. Dadurch wurde die Entscheidung bereits vorgängig festgelegt.

Variante	Eigenschaften / zu beachten
Eigenes Funknetz vom Hauptrechner	Unabhängig von vorhandener Netzwerkinfrastruktur, Internetzugang und Benutzerkonto.

Tabelle 30: Betriebsart Netz

7.2.15 Übersicht der betrachteten Varianten

Gegenstand	Möglichkeiten / Grundlage	Wichtige Kriterien
Kameras (Anzahl und Anordnung	Mehrere Blickrichtungen bestehende 3-Kamera-Anordnung	Sicht auf Dartspitze, feste Ausrichtung, Kalibrierung
Kameramodul	Verbreitete USB-Kameraklasse	Bewährtheit, Bildwinkel, Auflösung
Rechenplattform	Raspberry Pi 5, Raspberry Pi 4, Orange Pi 5 Plus	Baugrösse, Leistung, Treiber, Reserve
Anzeigerechner	Raspberry Pi3 B+ Raspberry Zero W Arduino Mega	Displayschnittstelle, Mobilität, Funk
Anzeigegerät	Touch-Display derselben Rechnerfamilie wie Anzeigerechner	Ablesbarkeit, Touch, Kompatibilität
Akkumodul	Aufsteckbares Modul, USB-Powerbank	Bauraum, Kabel, Wechsel Netz/Akku
LED-Ansteuerung	Funk-Controller, direkte und serielle Ansteuerung, kleinere Funkplatine	Pegel, Datenleitung, Unterstützung
LED-Spannung und Dichte	5 V, 12 V, zwei LED-Dichten	Strom, Spannungsabfall, Versorgung
Energieversorgung	Ein Netzteil mit Wandler, zwei Netzteile, gemeinsame 5-V-Versorgung	Reserve, Bauraum, Wärme
Dartscheibe	Vorhandene Scheibe	Masse als Eingangsgrössen
Trägerkonstruktion	Übernahme, Eigenkonstruktion,	Reproduzierbarkeit, Bauraum,

	vorhandene Teile	aufbaugebundene Teile
Programmiersprache	Python, C++, C#	Aufwand, Kenntnisse, Bibliotheken
Bildverarbeitung	Bibliotheken	Echtzeit, Kalibrierung, Konturen, Plattform
Oberflächenwerkzeug	PyQt6, Kivy, Tkinter	Touch, Vollbild, Skalierung, Schriftmasse Lernunterlagen
Übertragungsweg	Text/Binär, Vollstand/Änderungen	Mitlesbarkeit bei Fehlersuche, Wiederanlauf nach Unterbruch

Tabelle 31: Übersicht betrachtete Varianten

7.3 Evaluation der geeignetsten Variante

In Kapitel 7.2 wurden die möglichen Bauteile und Softwarelösungen ermittelt. Die eigentliche Auswahl/Gegenüberstellung erfolgt in diesem Kapitel. Dazu werden die zuvor betrachteten Varianten anhand der festgelegten Kriterien bewertet und miteinander verglichen. Ziel ist es, daraus die für DartVision geeigneten Bauteile und Softwarelösungen festzulegen.
Die Bewertung erfolgt in drei Schritten: Zuerst werden die Kriterien je Gegenstand festgelegt, danach mit einer Präferenzmatrix gewichtet und anschliessend mit einer Nutzwertanalyse bewertet.
Die Kriterien stammen aus den Anforderungen und den Vergleichen. Damit wird nur bewertet, was bereits zuvor als relevant festgelegt wurde.

Skala	Stufen
Wichtigkeit eines Kriteriums, 1 bis 3	3 bestimmend · 2 mitbestimmend · 1 nebensächlich
Teilnutzen eines Kandidaten, 1 bis 3	3 ohne Einschränkung erfüllt · 2 mit benannter Einschränkung 1 nur bedingt

Tabelle 32: Evaluation der geeignetsten Variante

Die Kosten werden ebenfalls bewertet. Der günstigste Kandidat erhält 3 Punkte. Liegt ein Kandidat bis 15% darüber, erhält er 2 Punkte. Bei mehr als 15% Mehrkosten wird, 1 Punkt vergeben. Liegen keine Preisangaben vor, wird das Kriterium Kosten nicht verwendet.

Bewertet werden nur die wichtigsten Bauteile und Softwarepakete. Folgende Gegenstände beinhaltet die genauere Betrachtung:

Nr.	Gegenstand	Kandidaten
1	Hauptrechner	drei Einplatinenrechner
2	Anzeigerechner	drei Rechnerbauformen
3	Ansteuerung der Beleuchtung	Funk-Controller · Hauptrechner unmittelbar · kleine Funkplatine
4	Netzteils	zwei Ausführungen derselben Baureihe

5	Programmiersprache	drei Sprachen
6	Bildverarbeitungsbibliothek	drei Bibliotheken

Tabelle 33: Evaluation der geeignetsten Variante

Nicht bewertet werden Dartscheibe, Ring- und Kamerahalterung, Kamerazahl und Kameramodul. Diese waren entweder vorgegeben, bereits vorhanden oder wurden aus bestehenden Lösungen übernommen. Auch Anzeigegerät und Akkumodul werden nicht mit einer Nutzwertanalyse bewertet, da dort keine gleichwertigen Varianten gegenübergestellt wurden.
Die Architektur der Versorgung wird ebenfalls nicht mit einer Nutzwertanalyse bewertet. Sie ist mit A20 und mit der gemeinsamen Spannungsebene von Beleuchtung und Rechnern bereits festgelegt. Ein zentrales Netzteil für 5 V, ohne Wandler und ohne zweites Gerät. Bewertet wird deshalb nur, welche Ausführung der gewählten Baureihe eingesetzt wird.
Vor der eigentlichen Bewertung werden Ausschlusskriterien geprüft. Ein Kandidat, der eine zwingende Randbedingung nicht erfüllt, wird nicht weiter bewertet.

Gegenstand	**Ausschlusskriterien**	**ausgeschieden**
Hauptrechner	Baugrösse im vorgesehenen Gehäuse · Lieferbarkeit	Orange Pi 5 Plus — Baugrösse
Anzeigerechner	Lieferbarkeit,	keiner
Netzteil	Lieferbarkeit, Baugrösse	keiner
Ansteuerung	Unterstützung im gewählten Rechner · Lieferbarkeit	Unmittelbare Ansteuerung
Sprache und Bibliothek	Keine. frei verfügbar, nichts zu beschaffen	keiner

Tabelle 34: Evaluation der geeignetsten Variante

An der Lieferbarkeit ist kein einziger Kandidat gescheitert. Sie steht trotzdem, weil sie die Auswahl von Anfang an eingegrenzt hat.

7.3.1 Präferenzmatrix

Mit der Präferenzmatrix werden die Kriterien eines Gegenstands gewichtet. Dazu werden die Kriterien paarweise miteinander verglichen. Aus den erreichten Punkten ergibt sich die prozentuale Gewichtung für die spätere Nutzwertanalyse.

Gegenstand	Kriterien mit ihrer Gewichtung in Prozent
Hauptrechner	drei Bildströme 29,41
	Treiber- und Softwareunterstützung 29,41
	Reserve 17,65
	Kosten 17,65
	Rechenleistung 5,88
Anzeigerechner	Anzeige- und Oberflächenunterstützung 30,76
	Leistung für die Oberfläche 23,08
	Aufwand und Risiko 23,08
	Kosten 23,08
Ansteuerung	Datenpegel 33,33
	Rückwirkung auf den Hauptrechner 33,33
	Länge der Datenleitung 16,67
	Ausstattung ab Werk 16,67
Netzteil	Deckung der berechneten Last 33,33
	Bauraum im Gehäuse 33,33
	Auslastung im Höchstfall 16,67
	Kosten 16,67
Programmiersprache	Bibliotheksanbindung 33,33
	Vorkenntnisse 33,33
	Entwicklungsaufwand 16,67
	Eignung auf der Rechnerfamilie 16,67
Bildverarbeitung	Echtzeitbetrieb 21,42
	Kalibrierung und Abbildung 21,42
	Konturverfahren 14,29
	Abdeckung des Arbeitsablaufs 14,29
	Verbreitung auf der Rechnerfamilie 14,29
	Verbreitung in vergleichbaren Vorhaben 14,29

Tabelle 35: Präferenzmatrix

Die vollständigen Präferenzmatrizen und das Vorgehen werden im Anhang aufgeführt.

7.3.2 Nutzwertanalyse

In der Nutzwertanalyse erhält jeder Kandidat je Kriterium einen Teilnutzen von 1 bis 3. Dieser wird mit der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums verrechnet. Daraus ergibt sich der Gesamtnutzen und damit die Rangfolge der Varianten.

Gegenstand	Erster	Zweiter	Dritter
1 Hauptrechner	Raspberry Pi 5 Resultat: 264,70	Raspberry Pi 4 Resultat: 229,41	—
2 Anzeigerechner	Raspberry Pi 3 B+ Resultat: 276,92	Pi Zero 2 W Resultat: 176,92	Arduino Mega Resultat: 146,16
3 Ansteuerung	Funk-Controller Resultat: 300,00	kleine Funkplatine Resultat: 200,00	—
4b Baugrösse	LRS-50-5 Resultat: 250,00	LRS-100-5 Resultat: 216,67	—
5 Programmiersprache	Python Resultat: 300,00	C++ Resultat: 233,33	C# Resultat: 183,33
6 Bildverarbeitung	OpenCV Resultat: 300,00	scikit-image Resultat: 178,58	SimpleCV Resultat: 121,42

Tabelle 36: Nutzwertanalyse

Die vollständigen Nutzwertanalysen und das Vorgehen werden im Anhang aufgeführt.

7.3.3 Sensitivitätsanalyse

Mit der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, ob sich die Rangfolge bei veränderter Gewichtung der Kriterien ändert. Dazu werden die höchsten Gewichtungen schrittweise miteinander getauscht, während die Teilnutzen gleichbleiben.
In keinem der Durchgänge änderte sich der erstplatzierte Kandidat. Bei Ansteuerung, Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek liegt der gewählte Kandidat ohnehin in allen Kriterien vorne oder gleichauf. Die detaillierten Ergebnisse stehen im Anhang in der Tabelle der Nutzwertanalyse.

7.4 Resultat der Evaluation

Die Evaluation zeigt für alle sechs bewerteten Gegenstände eine klare Rangfolge. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt diese Auswahl. Auch bei veränderter Gewichtung der Kriterien bleibt der jeweils erstplatzierte Kandidat unverändert. Damit können die ausgewählten Bauteile und Softwarelösungen als Grundlage für die weitere Ausarbeitung in Kapitel 8 übernommen werden. Damit ist A21 erfüllt: Die Auswahl der Komponenten ist anhand einer dokumentierten Evaluation gegen die Anforderungen aus Kapitel 5.3 getroffen worden.
Die folgende Übersicht fasst alle Festlegungen zusammen, die aus diesem Kapitel in die Ausarbeitung übernommen werden. Die dritte Spalte nennt, wo der Entscheid gefallen ist.

Gewählte Bauteile

Gegenstand	Gewählt	Entschieden
Hauptrechner	Raspberry Pi 5, 8 GB	Nutzwertanalyse
Anzeigerechner	Raspberry Pi 3 B+	Nutzwertanalyse
Ansteuerung der Beleuchtung	Funk-Controller GLEDOPTO GL-C-016WL-D mit ESP32	Nutzwertanalyse
Netzteil	Mean Well LRS-50-5, 5 V / 10 A	Nutzwertanalyse
Architektur der Versorgung	ein zentrales Netzteil, eine Spannungsebene 5 V	durch A20 festgelegt
LED-Streifen	WS2812B, BTF-5V-30L-W, 5 V, 30 LED je Meter	Beleuchtung und Ansteuerung
Kameramodul	drei baugleiche USB-Module mit Sensor OV9732	aus bestehenden Lösungen übernommen
Anzeigegerät	Raspberry Pi Touch Display 2, 7 Zoll	Aufgrund Auswahl Pi 3 B+
Akkumodul	PiSugar 3 Plus	Aufgrund Auswahl Pi 3 B+
Funkmodul des Zugangspunkts	USB-Modul mit RTL8822BU	Phase 6
Dartscheibe	Unicorn Eclipse Pro	Turnierscheibe
Ring- und Kamerahalterung	übernommene Konstruktion von OMMO	nicht bewertet, übernommen
Trägerkonstruktion	Tischplatte, Ø 90 cm	nicht bewertet, Eigenbau

Tabelle 37: Gewählte Bauteile

Gewählte Softwarelösungen

Gegenstand	Gewählt	Entschieden
Programmiersprache	Python	Nutzwertanalyse
Bildverarbeitungsbibliothek	OpenCV	Nutzwertanalyse
Erkennungsverfahren	rein bildgestützt, ohne Sensorik	Phase 4
Oberflächenwerkzeug	PyQt6	Phase 5
Übertragungsweg zwischen den Rechnern	TCP, ein JSON-Objekt je Zeile, jeweils der vollständige Spielzustand	Phase 6
Betriebsart des Netzes	eigenes Funknetz, vom Hauptrechner aufgespannt	durch A17 festgelegt
Betriebssystem beider Rechner	Raspberry Pi OS	nicht bewertet, Standard der Rechnerfamilie
Firmware des Lichtcontrollers	WLED 0.15.1	nicht bewertet, quelloffen übernommen und konfiguriert

Tabelle 38: Gewählte Softwarelösungen

8 Ausarbeitung DartVision

Die Ausarbeitung folgt dem erarbeiteten Phasenplan. Einzelne Phasen liefen dabei parallel ab. Zum Beispiel konnte die Programmierung der Kalibrierung vor dem mechanischen End-Aufbau gestartet werden. Die Kalibrierung muss jedoch am fertig aufgebauten Dartvision wiederholt werden. Direkt nach vollständigem Aufbau oder spätestens vor der Testphase. Zusatzaufwand wurde beurteilt und als akzeptabel eingestuft. Dieses Vorgehen wurde für den gesamten Ablauf umgesetzt. Vor der ersten Phase wurde analog zur Projektplanung eine Risikoanalyse inklusive 16er Matrix und Präventionsstrategie durchgeführt.

8.1 Phasenplan



Abbildung 7: Phasenplan

Die Reihenfolge der Phasen folgt nicht der Reihenfolge der Anforderungen, sondern ihren Abhängigkeiten. Gebaut wird zuerst, was andere Arbeiten trägt.
Daraus ergibt sich ein Bild, das auf den ersten Blick überrascht: Zwei der sieben Phasen lösen keine Anforderung unmittelbar ein. Der mechanische Aufbau der Phase 2 schafft die feste Geometrie, ohne die A1 bis A5 nicht erreichbar sind und die Kalibrierung der Phase 3 schafft die Umrechnung vom Bild-Punkt in Segment und Ring, ohne die A1 und A2 keinen Sinn ergeben. Beide Phasen sind damit Voraussetzung und nicht Selbstzweck.
Die übrigen Phasen lösen ihre Anforderungen unmittelbar ein. Phase 1 die Energieversorgung und das Grundlicht, Phase 4 die Erkennung und Wertung, Phase 5 die Spiellogik und die Bedienung, Phase 6 die Lichtereignisse und den eigenständigen Betrieb. Eine Anforderung erscheint zweimal: A8 verlangt die vollständige Übertragung des Spielzustands, die in Phase 5 entsteht und in Phase 6 gegen Verbindungsabbrüche tragfähig gemacht wird.
Phase 7 löst keine neue Anforderung ein, sondern weist alle fünfundzwanzig nach. Sie ist der Abschluss der Kette, die mit dem Pflichtenheft beginnt.

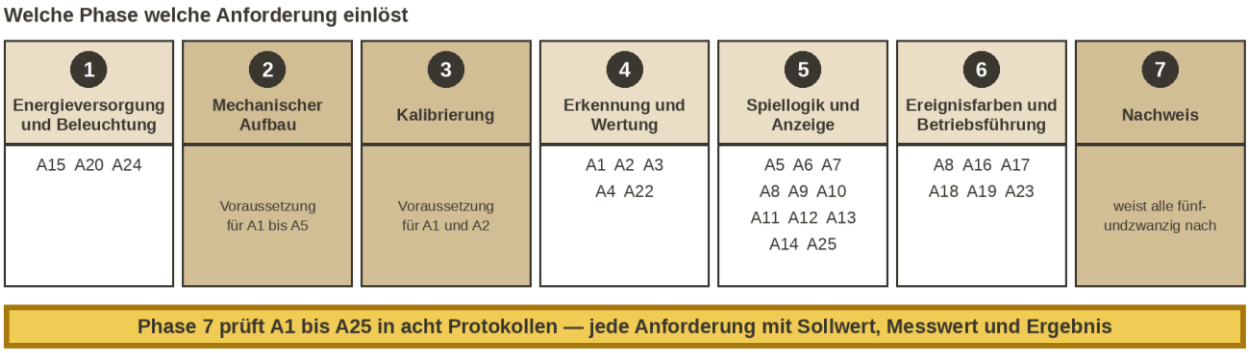


Abbildung 8: Welche Phase welche Anforderung einlöst

8.2 Risikoanalyse

ID	Risiko	Beschreibung	Wahrscheinlichkeit	Auswirkung	Eintrittsindikatoren	Worst-Case-Szenario	Stufe W	Stufe A	Risikozahl	Bereich
RL1	**Kamera verrutscht**	Die Kalibrierung gilt für die Geometrie, in der sie aufgenommen wurde. Eine verschobene Kamera macht sie ungültig	möglich	sehr hoch	Ein Feld wird wiederholt einem benachbarten zugeordnet die Abweichung zeigt in allen Würfen dieselbe Richtung	Das System wertet falsch, ohne zu stören · der Fehler fällt erst im Spielverlauf auf, wenn der Stand nicht mehr stimmt	2	4	8	**hoch**
RL2	**Fremdlicht verändert das Bild**	Die Erkennung arbeitet auf Differenzbildern. Helligkeitsänderungen erzeugen Änderungen, die kein Pfeil verursacht hat	möglich	hoch	Erkennungen ohne Wurf die Trefferquote sinkt zu bestimmten Tageszeiten	Phantomwürfe im Spiel die Wertung wird unbrauchbar, solange die Lichtlage besteht	2	3	6	**mittel**
RL3	**Das Netzteil läuft an seine Grenze**	Die Lastbilanz weist im rechnerischen Höchstfall 92 % Auslastung aus, die Reserve beträgt 0,85 A	möglich	hoch	Die Spannung an der Verteilung sinkt unter Last get_throttled meldet Unterspannung	Der Hauptrechner drosselt oder startet neu der Ausfall trifft mitten im Spiel	2	3	6	**mittel**
RL4	**Wärme im nahezu geschlossenen Gehäuse**	Ein Rechner unter Dauerlast in einem nahezu geschlossenen Gehäuse ohne Luftweg – die Wärmefrage stellt sich aus dem Aufbau	wahrscheinlich	hoch	Die Kerntemperatur steigt über 70 °C die Bildrate sinkt bei gleichbleibender Last	Der Rechner drosselt dauerhaft die Erkennung verliert Bilder und damit Würfe	3	3	9	**hoch**
RL5	**Selbststart oder Ruhezustand versagen**	A18 verlangt Betriebsbereitschaft ohne Eingriffe; drei Geräte müssen selbstständig hochkommen und sich finden	möglich	hoch	Ein Teilsystem meldet sich nach dem Einschalten nicht an der Ruhezustand wird nicht verlassen	Das System ist nur mit Tastatur und Bildschirm zu starten	2	3	6	**mittel**
RL6	**Ein abgeprallter Dart wird nicht erkannt**	Ein Pfeil, der nicht stecken bleibt, hinterlässt kein Bild, das sich von seiner Umgebung unterscheidet	wahrscheinlich	mittel	Ein Wurf erscheint nicht in der Aufnahme der Spieler meldet einen fehlenden Pfeil	Der Spielstand weicht ab, bis von Hand nachgetragen wird	3	2	6	**mittel**
RL7	**Der Lichtcontroller fällt aus**	Ein eigenes Gerät im Funknetz, mit eigener Versorgung und eigener Software	unwahrscheinlich	mittel	Farbbefehle bleiben ohne Wirkung das Gerät ist im Netz nicht erreichbar	Die Beleuchtung fällt aus und mit ihr die Grundlage der Bilderkennung	1	2	2	**niedrig**

Tabelle 39: Risikoanalyse Projektrealisation

Wahrscheinlichkeit	Stufe
unmöglich	0
unwahrscheinlich	1
möglich	2
wahrscheinlich	3

Auswirkung	Stufe
gering	1
mittel	2
hoch	3
sehr hoch	4

Bereich	ab Risikozahl
hoch	8
mittel	4
niedrig	bis 3

8.3 16er Matrix

Vor Präventionsstrategie

Auswirkung		Gering	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Wahrscheinlichkeit	Wahrscheinlich		RL6: abgeprallter Dart	RL4: Temperatur	
	Möglich			RL2: Fremdlicht RL3: Netzteil RL5: Selbststart/ Ruhezustand	RL1: Kamera
	Unwahrschein-lich		RL7: Ausfall Licht		
	Unmöglich				

Nach Präventionsstrategie

Auswirkung		Gering	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Wahrscheinlichkeit	Wahrscheinlich	RL6: abgeprallter Dart			
	Möglich		RL4: Temperatur RL5: Selbststart/ Ruhezustand		
	Unwahrschein-lich	RL7: Ausfall Licht	RL2: Fremdlicht	RL3: Netzteil	RL1: Kamera
	Unmöglich				

Tabelle 40: 16er Matrix vor & nach Präventionsstrategie

8.3.1 Präventionsstrategie

ID	Risiko	Massnahmen
RL1	Eine Kamera verrutscht	Übernommene Halterung, die nur eine Lage zulässt und keine verstellbaren Teile hat . Die Kameras sitzen in gedruckten Sitzen statt in Klemmen; die Kalibrierung ist als Datei abgelegt und in wenigen Schritten wiederholbar
RL2	Fremdlicht verändert das Bild	Der LED-Ring dient im Spielbetrieb als konstante Beleuchtung und überstrahlt wechselndes Umgebungslicht; das Hintergrund-modell wird laufend nachgeführt
RL3	Das Netzteil läuft an seiner Grenze	Der Helligkeitsbegrenzer deckelt den Einzelverbraucher. Der Höchstfall tritt nur bei weisser Vollaussteuerung auf, die im Spiel nicht vorkommt; der Wechsel auf die grössere Ausführung derselben Baureihe ist als Ausweg benannt
RL4	Wärme im Gehäuse	Aktive Kühlung statt passiver Kühlkörper – der Hersteller bietet sie für genau diesen Fall an. Die Kerntemperatur ist im Betrieb auslesbar und wird im Nachweis mitgeführt
RL5	Selbststart oder Ruhezustand versagen	Alle drei Teilsysteme starten über Benutzerdienste des Betriebssystems statt über Anmeldeskripte; der vollständige Kaltstart ist als Nachweis zu geführt
RL6	Ein abgeprallter Dart wird nicht erkannt	Die Korrekturfunktion nach E4 trägt den Wurf nach, ohne das Spiel abzubrechen
RL7	Der Lichtcontroller fällt aus	Er hängt an derselben abgesicherten Versorgung wie die übrigen Geräte. Die Spiellogik läuft ohne ihn weiter – die Beleuchtung ist Voraussetzung der Erkennung, nicht der Wertung

Tabelle 41: Präventionsstrategie

8.3.2 Bewertung

Vor der Prävention liegen von sieben Risiken zwei im hohen Bereich, vier im mittleren und eines im niedrigen. Nach der Prävention bleibt keines im hohen Bereich: drei liegen im mittleren, vier im niedrigen.
Die beiden hohen Risiken sind die, die den Aufbau selbst betreffen. Die Wärme im nahezu geschlossenen Gehäuse fällt von neun auf vier, die verrutschende Kamera von acht auf vier. In beiden Fällen senkt die Massnahme die Wahrscheinlichkeit, nicht die Auswirkung. Eine aktive Kühlung macht die Überhitzung unwahrscheinlich, sie macht sie nicht harmloser. Eine Halterung ohne verstellbare Teile macht das Verrutschen unwahrscheinlich, aber eine verschobene Kamera macht die Kalibrierung nach wie vor ungültig. RL1 behält deshalb als einziges Risiko die Stufe «sehr hoch» in der Auswirkung.
Eine Ausnahme von diesem Muster ist RL6. Ein abgeprallter Dart bleibt genau so wahrscheinlich wie vorher, denn an der Physik ändert keine Massnahme etwas. Hier sinkt die Auswirkung von mittel auf gering, weil die Korrekturfunktion den Wurf nachträgt, ohne das Spiel abzubrechen. Der Wurf geht nicht mehr verloren, er wird von Hand erfasst.
Daraus folgt, was nach der Prävention offenbleibt. Gegen das verbleibende Risiko der verschobenen Kamera hilft keine weitere Vorkehrung im Aufbau, sondern nur eine Prüfung im Betrieb: Die Zuordnungsprüfung vor jedem Spielstart nach A5 meldet eine Abweichung, bevor gespielt wird. Sie ist die betriebliche Antwort auf das grösste verbliebene Risiko.

8.4 Phase 1 – Energieversorgung und Beleuchtung

Vor dem mechanischen Aufbau wird die Energieversorgung und Beleuchtung bearbeitet. Ziel dieser Phase ist eine stabile 5-V-Versorgung für Hauptrechner, LED-Ring und Lichtcontroller. Die Kameras werden direkt über den Hauptrechner versorgt. Der LED-Ring ist dabei neben dem Hauptrechner der grösste dauerhafte Verbraucher, weil er während des Spiels gleichzeitig als Kamerabeleuchtung dient. Festgelegt werden in dieser Phase auch die Anschlüsse und Querschnitte jedes Abgangs. Die Umsetzung, also die eigentliche Verdrahtung, erfolgt erst in Phase 2 – mechanischer Aufbau.

8.4.1 Aufbau der Energieversorgung

Die Anlage besitzt einen zentralen 230-V-Netzanschluss. Von dort wird die Spannung über das C14-Kombimodul zum Mean Well LRS-50-5 geführt und anschliessend über WAGO-Klemmen auf die 5-V-Verbraucher verteilt. Der GLEDOPTO-Controller gibt nur das Datensignal an den Ring. Der Laststrom kommt direkt aus der Verteilung.

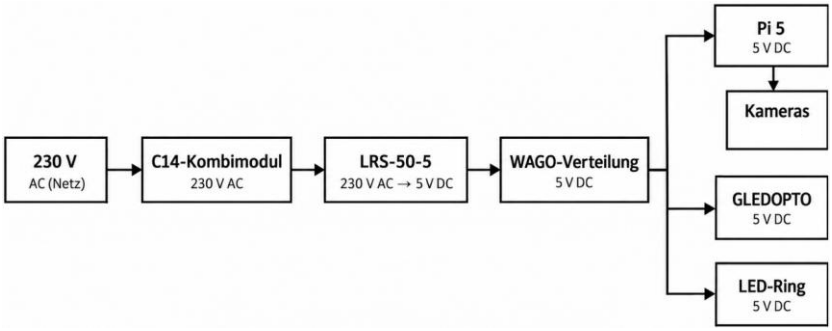


Abbildung 9: Schaltungsübersicht vereinfacht dargestellt

Die Anzeigeeinheit bleibt abnehmbar: Raspberry Pi 3 B+ und Display werden aus ihrem Akkumodul versorgt. Geladen wird das Modul aus derselben Verteilung. Die Strommessung in P-03 belegt, dass die Anlage auch mit der Anzeigeeinheit im Ladebetrieb unter dem Sollwert bleibt. Ein zweites Netzteil ist deshalb nicht verbaut.
Die folgenden Unterkapitel legen je Leitungsabschnitt Querschnitt, Aderfarbe, Anschlussart und Klemme fest. Sie sind die Grundlage der Verdrahtungsübersicht in 8.4.2.

8.4.1.1 Netzeingang und 230-V-Seite

Als Netzeingang wird ein C14-Kombimodul mit Kippschalter und Sicherungshalter verwendet. Die 230-V-Verdrahtung erfolgt mit L braun, N blau und PE grün-gelb in 0,75 mm².

Leiter	Farbe	Querschnitt	Von	Nach
L, Aussenleiter	braun	0,75 mm²	C14, geschaltet inkl. T 2 A	Klemme L am Netzteil
N, Neutralleiter	blau	0,75 mm²	C14	Klemme N am Netzteil
PE, Schutzleiter	grün-gelb	0,75 mm²	Schutzleiterstift am C14	Erdungsklemme am Netzteilgehäuse

Tabelle 42: Netzeingang und 230V

Der Schutzleiter führt nie über Schalter oder Sicherung. Er wird mit Überlänge verlegt, damit er bei Zug am Kabelbaum als letzter Leiter reisst. Am C14-Modul werden vollisolierte Flachsteckhülsen 4,8 mm verwendet, an den Schraubklemmen des Netzteils Aderendhülsen. An jedem Draht wird eine Zugprobe durchgeführt.

Prüfung	Sollwert
Durchgang des Schutzleiters, C14 bis Netzteilgehäuse	kleiner als 1 Ω
Schaltweg L, Schalter ein und aus	Durchgang vorhanden beziehungsweise unterbrochen
Trennung L gegen N, L gegen PE, N gegen PE	kein Durchgang
Berührungsschutz	Abdeckungen über Netzeingang und Netzteilklemmen montiert

Tabelle 43: Prüfungen an 230-V-Seite

Aus dem rechnerischen Maximalstrom auf der 5-V-Seite ergibt sich ein Eingangsstrom von rund 0,24 A. Die träge 2-A-Sicherung dient deshalb hauptsächlich dem Fehlerfall und muss gleichzeitig den kurzen Einschaltstrom des Schaltnetzteils verkraften.

8.4.1.2 Auslegung der 5-V-Versorgung

Verwendet wird ein Mean Well LRS-50-5 mit 5 V, 10 A und 50 W. Die Ausgangsspannung ist auf 5,15 V einzustellen, um Leitungsverluste bis zum Rechner und zum LED-Ring auszugleichen.

Verbraucher	Rechnerisches Maximum	Durchschnitt	Grundlage
LED-Ring, 68 × WS2812B	4,08 A	≈ 2,5 A	aus Leistungsangabe der Rolle
Raspberry Pi 5	5,0 A	≈ 2,5–3,0 A	Herstellerangabe zur Versorgung
3 Kameramodule	0,75 A	≈ 0,5 A	sicherheitsseitige Annahme
Summe	9,83 A	≈ 5,5–6,0 A	Ohne Begrenzer. Mit = 9.15A

Tabelle 44: Auslegung 5V-Versorgung

Der vollständige Rechenweg mit Belegart je Eingangswert steht im Anhang.

8.4.1.3 Die zentrale 5-V-Verteilung

Vom Netzteil führt je eine Leitung auf zwei getrennte Verteilklemmen: eine für V+ und eine für V−. An einer Klemme liegt ausschliesslich rot, an der anderen ausschliesslich schwarz.

Verbindung	Farbe	Querschnitt	Anschluss
Netzteil +V auf Verteilklemme V+	rot	1,5 mm²	Schraubklemme mit Aderendhülse auf WAGO 221-415
Netzteil −V auf Verteilklemme V−	schwarz	1,5 mm²	Schraubklemme mit Aderendhülse auf WAGO 221-415

Tabelle 45: Verbindung Netzteil zur Verteilung

Der Querschnitt von 1,5 mm² ist gewählt, weil über diese beiden Leitungen der Gesamtstrom aller Verbraucher fliesst. Bei 0,25 m Länge und dem rechnerischen Maximum von 9,15 A beträgt der Spannungsabfall über Hin- und Rückleiter rund 0,05 V. Jeder weitere Abgang führt nur noch den Strom seines eigenen Verbrauchers.
Die Verteilklemmen fassen fünf Leiter und sind vollständig belegt. An der V+-Klemme liegen die Zuleitung vom Netzteil, der Abgang zum Hauptrechner, zum Lichtcontroller, die gemeinsame Zuleitung des LED-Rings und die Ladezuleitung der Anzeigeeinheit. An der V−-Klemme entsprechend die Rückleiter. Der LED-Ring belegt dabei nur einen Platz, weil seine beiden Einspeisungen erst unmittelbar vor dem Ring auf einer eigenen zweipoligen Klemme aufgeteilt werden. Ohne diese Aufteilung bliebe für die Anzeigeeinheit kein Abgang übrig.

8.4.1.4 Zuleitung zum Hauptrechner

Der Raspberry Pi 5 wird über ein konfektioniertes USB-C-Kabel mit offenen Enden versorgt, das an der Verteilung angeschlossen wird. Dieser Abgang ist der kritische: Der Rechner zieht bis zu 5 A und er meldet Unterspannung, sobald die Spannung an seinem Eingang unter 4,9 V fällt.

Verbindung	Farbe	Querschnitt	Anschluss
Verteilklemme V+ auf USB-C-Zuleitung	rot	0,5 mm²	Push-in-Klemme mit Aderendhülse
Verteilklemme V− auf USB-C-Zuleitung	schwarz	0,5 mm²	Push-in-Klemme mit Aderendhülse

Tabelle 46: Zuleitung zum Hauptrechner

Die Leitung wird auf höchstens 0,30 m gekürzt. Bei 5 A ergibt das über Hin- und Rückleiter einen Spannungsabfall von rund 0,10 V. Zusammen mit der auf 5,15 V angehobenen Ausgangsspannung bleibt der Eingang des Rechners damit über dem Sollwert von 4,9 V.
Der Sollwert wird in der Inbetriebnahme unter Last geprüft: Die Drosselungsabfrage des Rechners muss bei Spielbetrieb 0x0 liefern.

8.4.1.5 Zuleitung zum Lichtcontroller

Der GLEDOPTO-Controller wird aus derselben Verteilung versorgt. Er trägt den Laststrom des Rings nicht. Über ihn laufen nur seine eigene Aufnahme und das Datensignal.

Verbindung	Farbe	Querschnitt	Anschluss
Verteilklemme V+ auf Eingang V+ des Controllers	rot	0,75 mm²	Push-in-Klemme mit Aderendhülse
Verteilklemme V− auf Eingang V− des Controllers	schwarz	0,75 mm²	Push-in-Klemme mit Aderendhülse

Tabelle 47: Zuleitung zum Lichtcontroller

Der Leistungsausgang des Controllers bleibt unbenutzt.

8.4.1.6 Einspeisung und Datenleitung des LED-Rings

Der LED-Ring wird an beiden Streifenenden eingespeist. Dadurch teilt sich der Laststrom auf zwei Wege und der Spannungsabfall über die Streifenlänge von rund 2,27 m halbiert sich gegenüber einer einseitigen Einspeisung. Bei begrenzter Vollaussteuerung von 3,40 A führt jede Einspeisung rund 1,7 A.
Die Aufteilung erfolgt nicht an der Hauptverteilung, sondern erst unmittelbar vor dem Ring: Von X2.4 und X3.4 führt je eine Leitung zu einer eigenen zweipoligen Klemme und erst dort entstehen die beiden Zweige. Das hat zwei Gründe. Die Feinsicherung liegt damit in einer einzigen Leitung und schützt beide Zweige zugleich und an der Hauptverteilung bleibt ein Abgang für die Ladezuleitung der Anzeigeeinheit frei.

Verbindung	Ader	Querschnitt	Anschluss
X2.4 über die Feinsicherung auf die zweipolige Klemme X4	rot	0,75 mm²	Push-in-Klemme
X4 auf den Streifenanfang	rot, VCC	0,75 mm²	Push-in-Klemme, Lötstelle am Streifen
X4 auf das Streifenende	rot, VCC	0,75 mm²	Push-in-Klemme, Lötstelle am Streifen
X3.4 auf die zweipolige Klemme X5	schwarz	0,75 mm²	Push-in-Klemme

Verbindung	Ader	Querschnitt	Anschluss
X5 auf den Streifenanfang	weiss, GND	0,75 mm²	Push-in-Klemme, Lötstelle am Streifen
X5 auf das Streifenende	weiss, GND	0,75 mm²	Push-in-Klemme, Lötstelle am Streifen
Datenausgang GPIO16 des Controllers auf den Streifenanfang	grün, DAT	0,5 mm²	Klemme am Controller, Lötstelle am Streifen
Masseklemme des Controllers auf den Streifenanfang	weiss, GND	0,5 mm²	Klemme am Controller, Lötstelle am Streifen

Tabelle 48: Einspeisung und Datenleitung des LED-Rings

Bei 0,80 m Leitungslänge je Einspeisung und 1,7 A beträgt der Spannungsabfall über Hin- und Rückleiter rund 0,06 V. Zusammen mit dem Abfall über den Streifen selbst bleibt die Spannung am ungünstigsten Punkt über dem Sollwert von 4,8 V.

Messstelle	Sollwert
Verteilung	5,15 V eingestellt
Streifenanfang	mindestens 4,8 V
Streifenende	mindestens 4,8 V
Unterspannungsmeldung des Rechners	keine

Tabelle 49: Sollwerte der 5-V-Seite

Zwei Festlegungen mit Begründung. Erstens der gemeinsame Massebezug: Das Datensignal ist eine Spannung gegen Masse. Ohne die Verbindung von der Masseklemme des Controllers zum Streifenanfang gibt es keinen definierten Logikpegel und der Ring zeigt zufälliges Verhalten, obwohl Versorgung und Daten scheinbar richtig angeschlossen sind. Zweitens die Aderfarben am Streifen: Dort bedeutet weiss die Masse und nicht schwarz.

8.4.1.7 Ladezuleitung der Anzeigeeinheit

Die Anzeigeeinheit ist abnehmbar und deshalb nicht dauernd angeschlossen. Ihr Akkumodul wird über ein USB-C-Kabel aus derselben Verteilung geladen. Beim Abnehmen der Anzeige wird dieses Kabel gelöst. Im Verdrahtungsplan ist die Verbindung aus diesem Grund gestrichelt dargestellt.

Verbindung	Farbe	Querschnitt	Länge
X2.5 auf USB-C V+ des Akkumoduls	rot	0,5 mm²	0,2 m
X3.5 auf USB-C V− des Akkumoduls	schwarz	0,5 mm²	0,2 m

Tabelle 50: Ladezuleitung der Anzeigeeinheit

Bei 0,2 m Länge und dem vom Hersteller genannten Eingangsstrom des Akkumoduls von höchstens 3,0 A beträgt der Spannungsabfall über Hin- und Rückleiter rund 0,04 V.

8.4.1.8 Absicherung und Berührungsschutz

Spannungsebene	Absicherung	Zweck	Stand
230 V	T 2 A träge	Fehlerfall und Einschaltstrom des Netzteils	verbaut und geprüft
5 V, Zuleitung LED-Ring	5 A flink, 6,3 × 32 mm	Leitungsschutz beider Einspeisungen	beschafft, nicht verbaut

Tabelle 51: Absicherung

Die Feinsicherung in der LED-Zuleitung hat einen bestimmten Grund. Weil der Leistungsausgang des Controllers unbenutzt bleibt und die Einspeisung direkt ab der Verteilung erfolgt, liegt dessen werkseitige Sicherung nicht im Strompfad. Das Netzteil schützt nur beim harten Kurzschluss. Ein Teilfehler im Streifen mit einem Dauerstrom von sechs bis acht Ampere würde die Zuleitungen überlasten, ohne dass eine Schutzeinrichtung anspricht. Die Sicherung schliesst diese Lücke.
Aufgrund der verspäteten Lieferung wurde sie noch nicht verbaut. Das Risiko wurde bewertet und als gering eingestuft. Die Anlage wird zudem nur unter Aufsicht betrieben.
Berührungsschutz: Die Abdeckungen über dem Netzeingang und den Netzteilklemmen verhindern den direkten Zugriff auf die 230-V-Anschlüsse. Die primäre elektrische Isolation übernehmen die gekauften Komponenten selbst. Die 3D-gedruckten Teile dienen als zusätzliche Sicherheit.

8.4.1.9 Temperatur und Dauerbetrieb

Das Netzteil bleibt im originalen Blechgehäuse und die Lüftungsschlitze bleiben frei. Die veröffentlichte Derating-Kurve gilt für horizontale Montage, während das Netzteil im Aufbau vertikal eingebaut ist. Für diese Lage nennt der Hersteller keinen eigenen Faktor. Deshalb wird die Temperatur in eingebautem Zustand geprüft. Die Auswertung steht im Projektabschluss. Die Höchsttemperaturen liegen deutlich unter kritischem Wert.

8.4.1.10 Spannungsabfall auf den Abgängen

Jeder Abgang verliert auf dem Weg zum Verbraucher Spannung. Massgebend sind Strom, Länge und Querschnitt der Leitung. Für eine Zuleitung mit Hin- und Rückleiter gilt:
$\Delta U = 2 \cdot \rho \cdot I \cdot I / A$
Darin ist ΔU der Spannungsabfall in Volt, ρ der spezifische Widerstand von Kupfer mit 0,0175 Ω·mm²/m bei 20 °C, I die einfache Leitungslänge in Metern, I der Strom in Ampere und A der Querschnitt in Quadratmillimetern. Der Faktor zwei steht für den Hin- und den Rückleiter, weil der Strom beide durchfliesst. Angewendet auf die vier Abgänge ergibt sich:

Abgang	Querschnitt	Länge	Strom	Abfall
Netzteil bis Verteilung	1,5 mm²	0,25 m	9,15 A	0,05 V
Verteilung bis Hauptrechner	0,5 mm²	0,30 m	5,0 A	0,10 V
Verteilung bis Anzeigeeinheit	0,5 mm²	0,20 m	3,0 A	0,04 V
Aufteilklemme bis Streifenende, je Zweig	0,75 mm²	0,80 m	1,7 A	0,06 V

Tabelle 52: Spannungsabfall auf den Abgängen

Zwei Dinge lassen sich daran ablesen. Erstens ist nicht der grösste Strom massgebend, sondern das Verhältnis aus Strom, Länge und Querschnitt: Der Abgang zum Hauptrechner verliert trotz kurzer Leitung am meisten, weil er den höchsten Strom über den kleinsten Querschnitt führt. Zweitens begründet die Rechnung die auf 5,15 V angehobene Ausgangsspannung. Der ungünstigste Weg führt über die

Hauptzuleitung und den Abgang zum Rechner und verliert zusammen rund 0,15 V; am Eingang des Rechners bleiben damit etwa 5,0 V und der Sollwert von 4,9 V ist eingehalten.

8.4.2 Verdrahtungsübersicht

Die Verdrahtungsübersicht fasst die Festlegungen der vorangehenden Unterkapitel in einer Darstellung zusammen. Sie ist das Dokument, nach dem in Phase 2 verdrahtet wird und zeigt je Verbindung die Klemme, die Aderfarbe und den Querschnitt.

Abschnitt	Querschnitt	Farben	Festgelegt in
Netzeingang bis Netzteil	0,75 mm²	braun, blau, grün-gelb	8.4.1.1
Netzteil bis Verteilung	1,5 mm²	rot, schwarz	8.4.1.3
Verteilung bis Hauptrechner	0,5 mm²	rot, schwarz	8.4.1.4
Verteilung bis Lichtcontroller	0,75 mm²	rot, schwarz	8.4.1.5
Verteilung bis zweipolige Klemme, je Potential eine Leitung	0,75 mm²	rot, schwarz	8.4.1.6
Zweipolige Klemme bis LED-Ring, beide Enden	0,75 mm²	rot, weiss	8.4.1.6
Controller bis Streifenanfang, Daten und Masse	0,5 mm²	grün, weiss	8.4.1.6
Verteilung bis Anzeigeeinheit, nicht dauernd angeschlossen	0,5 mm²	rot, schwarz	8.4.1.7

Tabelle 53: Übersicht der Leitungsabschnitte

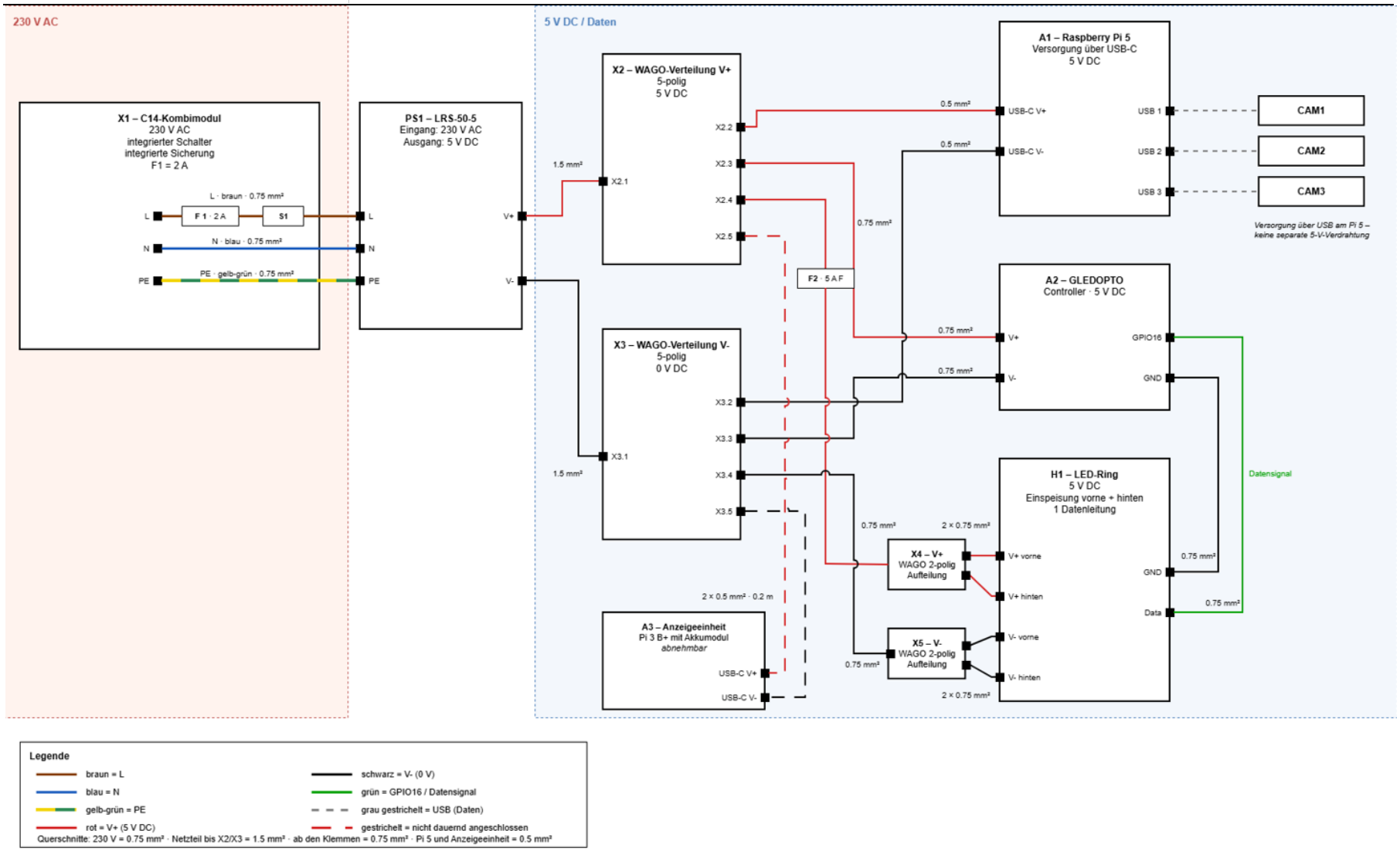


Abbildung 10: Verdrahtungsübersicht

8.4.3 Schaltungsübersicht

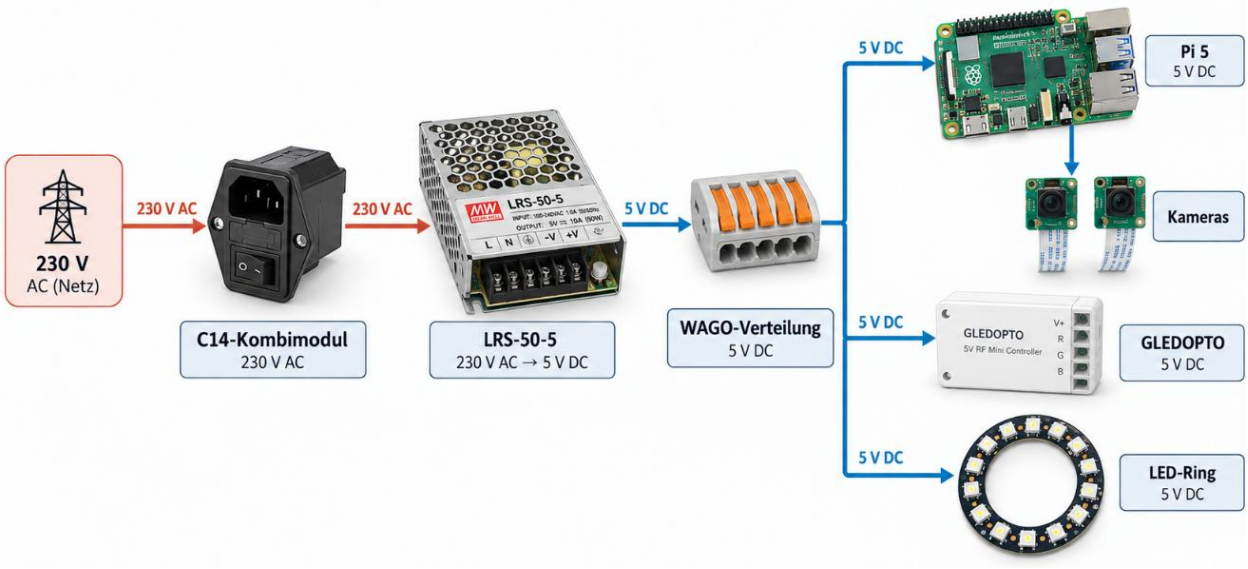


Abbildung 11: Schaltungsübersicht

8.4.4 Abschluss der Phase

Die Phase ist vorübergehend abgeschlossen. Alle Verbraucher sind für die stabile 5-V-Versorgung ausgelegt und wo nötig berechnet worden. Für jeden Leitungsabschnitt sind Querschnitt, Aderfarbe und Anschlussart festgelegt. Die Verdrahtungs- und Schaltungsübersicht fassen diese Festlegungen zusammen. Damit kann in Phase 2 verdrahtet werden, ohne dass während des Aufbaus noch Entscheide zu treffen sind. Vollständig abgeschlossen ist die Phase zusammen mit Phase 2, dem mechanischen Aufbau. Damit sind A20 und A24 auf der Seite der Auslegung eingelöst. Den messtechnischen Nachweis führt Phase 7. Mit dem auf Vollweiss eingerichteten Ring ist zugleich A15 erfüllt.

8.5 Phase 2 – mechanischer Aufbau

Nach der Auslegung von Energieversorgung und Beleuchtung folgt der mechanische Aufbau, in dem auch die in Phase 1 geplante elektrische Verdrahtung ausgeführt wird. Ziel dieser Phase ist ein tragfähiger Aufbau, der die drei Kameras dauerhaft in ihrer Lage hält und Rechnereinheit, Energieversorgung, Lichtcontroller und LED-Ring aufnimmt. Die Lage der Kameras ist dabei die bestimmende Grösse, weil eine Kalibrierung nur für die Geometrie gilt, in der sie aufgenommen wurde. Die Kalibrierung erfolgt deshalb erst in Phase 3 – Kalibrierung, wenn der Aufbau vollständig steht und sich nichts mehr verschiebt.

8.5.1 Trägerkonstruktion und Kameraanordnung

Als Träger dient eine runde Tischplatte mit 90 cm Durchmesser und 28 mm Dicke. Diese wurde auf die benötigte Grösse zugeschnitten und lackiert. Auf dem Träger wird die gesamte Hardware ausser dem Ständer, der Displayhalterung und dem Display selbst verbaut.

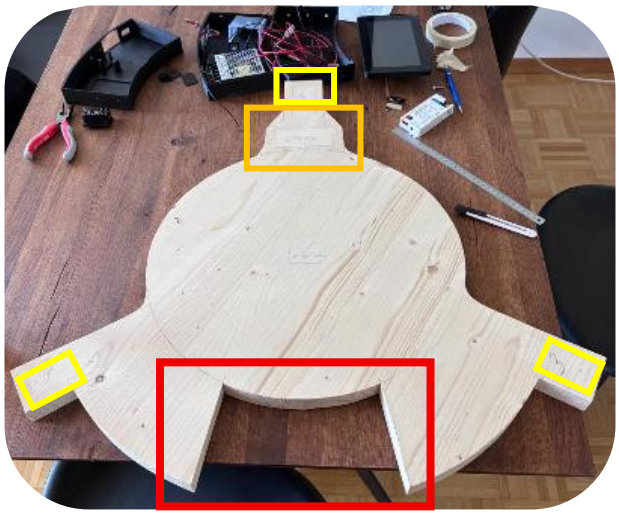


Abbildung 12: Holzträger

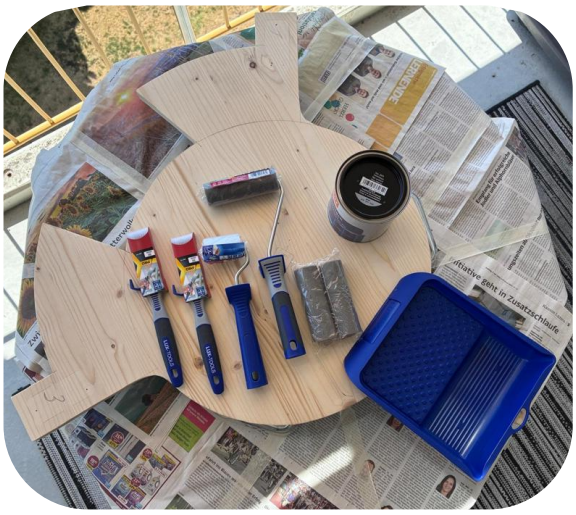


Abbildung 13: Holzträger vor Lackierung

Die Trägerplatte ist einseitig matt schwarz lackiert. Dadurch werden Spiegelungen des LED-Rings im Kamerabild reduziert und die Optik verbessert. Drei Kameras sitzen im Kameraring um 120° versetzt.
Markierungen im ersten Bild: Der Bauraum für die Rechnereinheit und die Stromversorgung befindet sich im rot markierten Bereich. Der ESP32 für die Beleuchtung wird im orangen markierten Bereich verbaut und der Kamera-LED-Ring wird an den gelb markierten Positionen befestigt.

8.5.2 3D-Druck – Eigenkonstruktion und übernommene Bauteile

Alles, was eine Befestigung, eine Abdeckung oder Halterung benötigt, wird in Eigenkonstruktion mit dem Konstruktionstool FreeCAD erarbeitet und auf dem vorhandenen 3D Drucker Bambu Lab P1S ausgedruckt. Lediglich für den Kamera-LED-Ring wurde auf eine bestehende Konstruktion zurückgegriffen, auf den veröffentlichten Satz «OMMO Dartboard ring» des Urhebers OMMO auf der Plattform MakerWorld, in dessen zweiter Fassung. Die Dateien wurden unverändert gedruckt, auf demselben Drucker und mit demselben Werkstoff wie die Eigenkonstruktionen.
Dies, da anhand der Risikoanalyse bekannt ist, dass ein nicht stabil genug gebauter Aufbau, die Kalibrierung/Wertung beeinträchtigen könnte. Zudem wäre der Konstruktionsaufwand, um eine vergleichbare

Version herstellen zu können, nicht verhältnismässig gewesen. Die Lizenz der Plattform erlaubt den Druck für den eigenen Gebrauch. Die übernommenen Dateien werden mit dieser Arbeit nicht weitergegeben. Für den Aufbau mussten die folgenden Bauteile konstruiert und gedruckt werden:

Bauteil	Stück	Aufgabe
Füsse Display	2	Standfüsse der abnehmbaren Anzeigeeinheit; sie tragen das Querformat kippsicher
Display_Darts_Halterung	1	wird am Ständer befestigt, trägt die Anzeigeeinheit und nimmt zugleich sechs Darts zur Aufbewahrung auf
Pi5_lrs_C14_Haupthalterung	1	trägt den Hauptrechner, das Netzteil und das Netzeingangsmodul auf einer gemeinsamen Grundplatte
Haupthalterung_Abdeckung	1	Abdeckung derselben Baugruppe
C14_Abdeckung	1	Berührungsschutz über der 230-V-Seite des Netzeingangsmoduls
lrs-50-5_Abdeckung	1	Abdeckung der Klemmleiste des Netzteils, ohne die Lüftungsschlitze zu verschliessen
Pi5_Abdeckung	1	Abdeckung des Hauptrechners mit seiner aktiven Kühlung
Pi3_PiSugar_Abdeckung	1	Abdeckung des Anzeigerechners samt Akkumodul
Pi3_PiSugar_Deckel		Deckel für Pi3_PiSugar_Abdeckung
ESP32_Abdeckung	1	Abdeckung des LED-Controllers
Display_Abdeckung	1	Rückseitige Abdeckung des Anzeigegeräts

Tabelle 54: 3D Druckteile

Für alle Bauteile war das Vorgehen identisch. Zuerst wurde der vorhandene Bauraum und die zu verbauenden/abzudeckenden Bauteile genau ausgemessen. Im nächsten Schritt wurden die Halterungen, Abdeckungen und Befestigungen dazu konstruiert. Im Anschluss an das Drucken, wurde ein Einbautest durchgeführt. Bei Abweichungen, Bauteil konstruktiv angepasst und erneut gedruckt, bis passend.

8.5.2.1 Abbildungen einzelner Bauteile

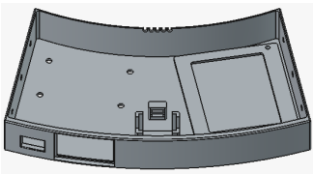


Abbildung 14: Haupthalterung

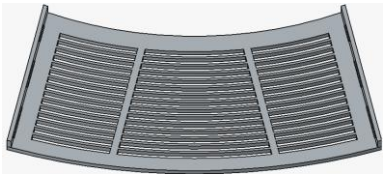


Abbildung 15: Abdeckung Halterung

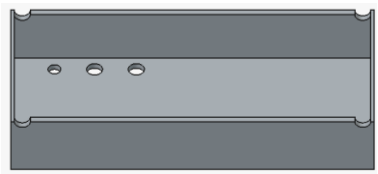


Abbildung 16: ESP32 Abdeckung

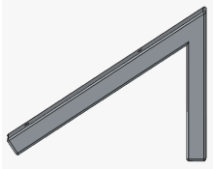


Abbildung 17: Füsse Display

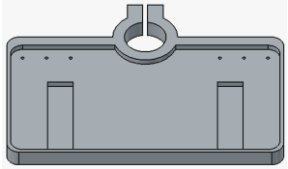


Abbildung 18: Displayhalterung

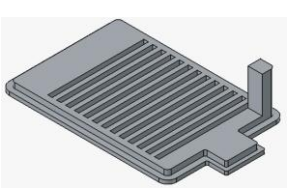


Abbildung 19: Pi3 B+ Deckel

8.5.2.2 Fertigungsangaben

Angabe	Wert
Konstruktion	FreeCAD
Aufbereitung	Bambu Studio
Fertigung	Bambu Lab P1S
Werkstoff	PLA
Schichthöhe	0,2 mm
Stützstrukturen	verwendet

Tabelle 55: 3D Druck Fertigungsangaben

8.5.3 Aufbau Display

Für den Displayaufbau wurden die folgenden Bauteile benötigt:

Bezeichnung	Typ	Stückzahl
Anzeigeeinheit	Raspberry Pi 3 B+	1
Akkumodul der Anzeigeeinheit	PiSugar 3 Plus	1
Touch-Display	Raspberry Pi Touch Display 2, 7 Zoll	1
Pi3_PiSugar_Abdeckung	Abdeckung des Anzeigerechners samt Akkumodul	1
Pi3_PiSugar_Deckel	Deckel für Pi3_PiSugar_Abdeckung	1
Display_Abdeckung	Rückseitige Abdeckung des Anzeigegeräts	1
Füsse Display	Standfüsse der abnehmbaren Anzeigeeinheit; sie tragen das Querformat kippsicher	2

Tabelle 56: Aufbau Display

Für die Datenverbindung vom Raspberry Pi 3 B+ zum Touch Display wurde ein Flachbandkabel verwendet. Für die Energieversorgung bestanden Anschlüsse vom Display. Musste bei Pi 3 B+ bei +5V und GND angeschlossen werden.



Abbildung 20: Frontansicht



Abbildung 21: Rückansicht offen



Abbildung 22: Rückansicht geschlossen



Abbildung 23: Ansicht schräg

8.5.4 Gesamtaufbau

In diesem Schritt werden die zuvor eingekauften und hergestellten Bauteile zu einem Gesamtaufbau zusammengefügt. Für die Verdrahtung wird der zuvor erstellte Verdrahtungsplan verwendet. Alle Arbeiten fanden im stromlosen Zustand statt.

8.5.4.1 Gesamtaufbau Endresultat



Abbildung 24: Gesamtaufbau Endresultat

8.5.4.2 Teilschritte



Abbildung 25: Hauptgehäuse

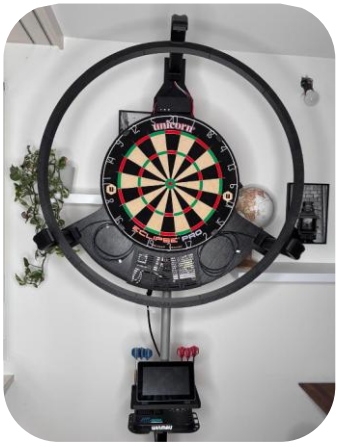


Abbildung 26: Aufbau ohne Schutz

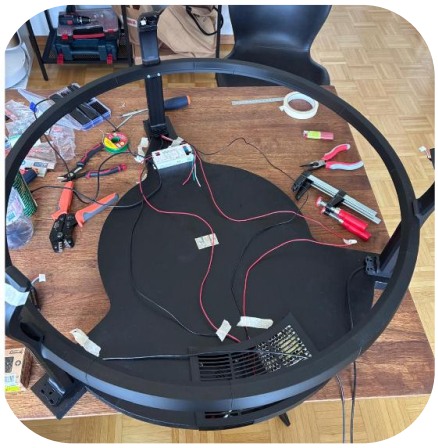


Abbildung 27: Verdrahtungsübersicht

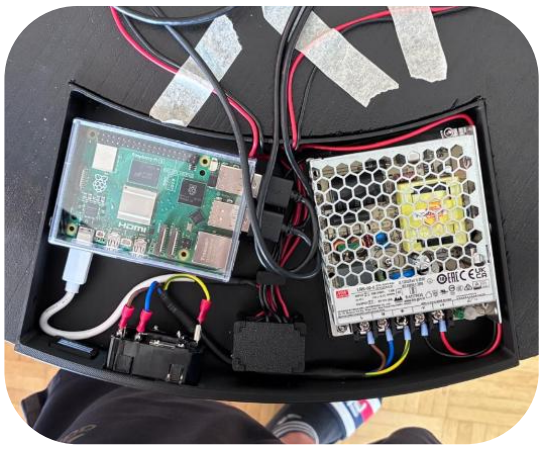


Abbildung 28: Verdrahtungsübersicht Hauptgehäuse



Abbildung 29: Verdrahtungsübersicht

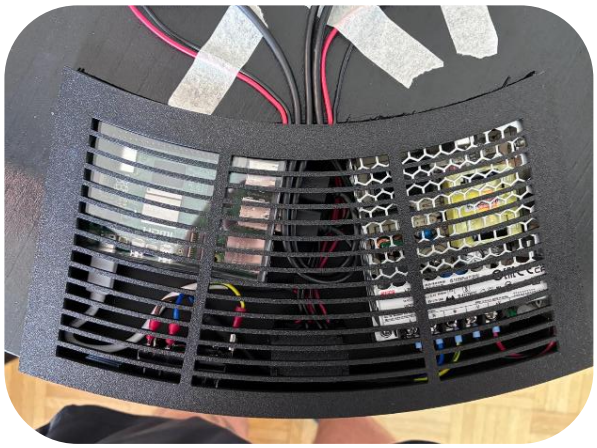


Abbildung 30: Abdeckung Hauptgehäuse



Abbildung 31: Aufbau Träger&Schutz

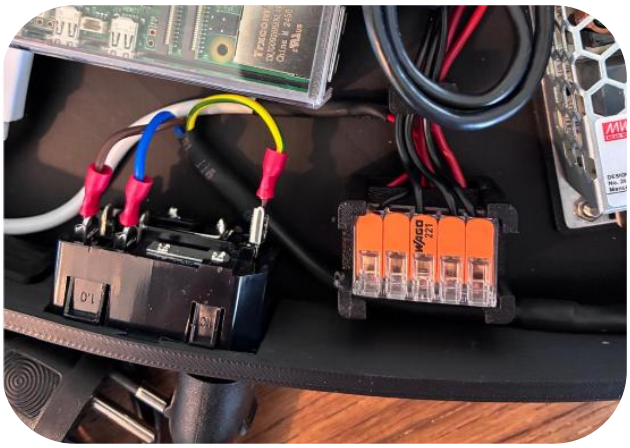


Abbildung 32: C14 Kippschalter & WAGO-Klemmen

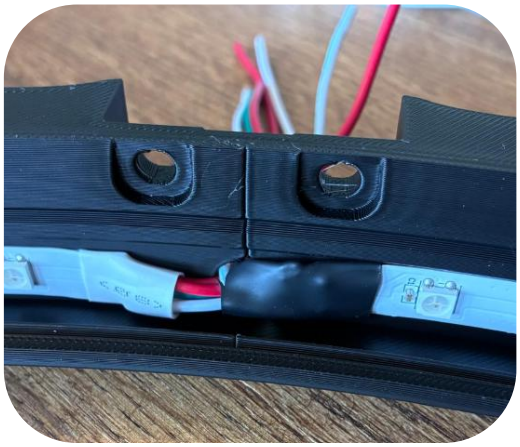


Abbildung 33: Anschlüsse LED-Ring



Abbildung 34: Kameramontage

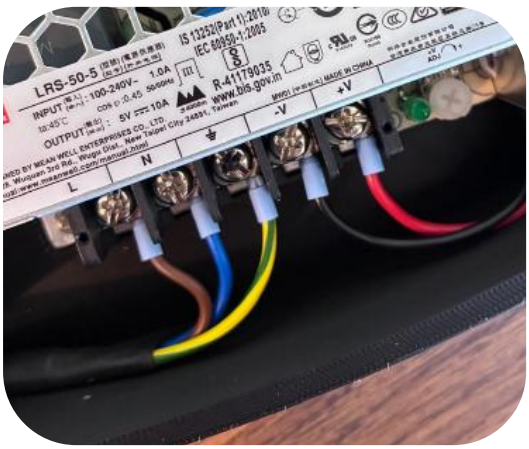


Abbildung 35: Anschlüsse Netzteil



Abbildung 36: ESP32

8.5.4.3 Vollständige Stückliste

Nr.	Bezeichnung	Stk.	Typ	Kenngrössen	Preis
1	**Rechner**				
1.1	Erkennungseinheit	1	Raspberry Pi 5, 8 GB	5V, bis 5,0 A	138.50 CHF
1.2	Aktive Kühlung	1	Raspberry Pi Active Cooler SC1148	Aluminiumkühlkörper mit Lüfter, verklebt	7.20 CHF
1.3	Anzeigeeinheit	1	Raspberry Pi 3 B+	Anzeige-Client, PyQt6	25.50 CHF
2	**Kameras**				
2.1	Kameramodul, baugleich	3	HBVCAM, Sensor OV9732	1280 × 720 bei 30 fps, MJPG, USB `1e45:8022`, rund 100° Bildwinkel	28.59 CHF
3	**Lichteinheit**				
3.1	LED-Ring	1	WS2812B, BTF-5V-30L-W	5 V, 30 LED/m, 68 LEDs, rund 2,27 m, 45 W je 5-m-Rolle	39.90 CHF
3.2	LED-Controller	1	GLEDOPTO GL-C-016WL-D, ESP32	WLED 0.15.1, GPIO16, WS281x, GRB, Pegelwandler integriert	27.90 CHF
4	**Energieversorgung**				
4.1	Netzteil	1	Mean Well LRS-50-5	5 V / 10 A / 50 W, Poti auf 5,15 V, Wirkungsgrad 0,83	13.95 CHF
4.2	Netzeingang	1	C14-Kombimodul	beleuchteter Kippschalter, Vorsicherung T 2 A träge, 5 × 20 mm	5.90 CHF
4.3	Verteilklemme	2	WAGO 221-415	getrennt für V+ und V−	1.00 CHF
4.4	Versorgungsleitung Pi 5	2	USB-C-Pigtail	20 AWG, gekürzt	9.90 CHF
4.5	Litzenset	—	—	1,5 / 0,75 / 0,5 mm², Aderendhülsen, Flachsteckhülsen 4,8 mm	1.75 CHF
4.6	Feinsicherung mit Inline-Halter	1	5 A flink	6,3 × 32 mm, im LED-V+-Zweig	1.65 CHF
4.7	Akkumodul der Anzeigeeinheit	1	PiSugar 3 Plus	5 V, Eingang max. 3,0 A, I²C-Ladezustandsabfrage	29.99 CHF
5	**Anzeige**				
5.1	Touch-Display	1	Raspberry Pi Touch Display 2, 7 Zoll	1280 × 720, Querformat, DSI 15 auf 15 polig	61.34 CHF
6	**Netz**				
6.1	USB-WLAN-Stick	1	Realtek RTL8822BU	`wlan1`, AP-Modus	24.95 CHF
7	**Mechanik**				
7.1	Eigenkonstruktion, zehn Eigenkonstruktionen in elf Stück	11	FDM-Druck	PLA, Schichthöhe 0,2 mm, mit Stützstrukturen; FreeCAD · Bambu Studio · Bambu Lab P1S	25.00 CHF
7.2	Ring- und Kamerahalterung	1	OMMO, MakerWorld	übernommene Konstruktion, unverändert gedruckt	25.00 CHF
7.3	Trägerkonstruktion und Grundplatte	1	Tischplatte	Ø 90 cm, 28 mm dick	50.00 CHF
7.4	Dartscheibe	1	Unicorn	Unicorn Eclipse Pro Dartboard	50.00 CHF
7.5	Ständer	1	Winmau	Winmau Xtreme Dartständer 2	80.00 CHF

Tabelle 57: Stückliste komplett

8.5.5 Inbetriebnahme

Vor der ersten Inbetriebnahme wurde die gesamte Verdrahtung nochmals kontrolliert. Dabei wurden insbesondere die Anschlüsse von Netzteil, WAGO-Verteilung, Raspberry Pi 5, LED-Controller und LED-Ring geprüft. Auf der 230-V-Seite wurden Schutzleiter, Schaltweg, Sicherung sowie die Trennung zwischen L, N und PE kontrolliert. Zusätzlich wurde sichergestellt, dass auf der 5-V-Seite kein Kurzschluss vorhanden ist und alle Abdeckungen über den spannungsführenden Anschlüssen montiert sind.

Anschliessend wurde das Netzteil zunächst ohne angeschlossene Verbraucher eingeschaltet und die Ausgangsspannung auf 5,15 V eingestellt. Dieser Wert wurde bewusst etwas über 5,0 V gewählt, um die Leitungsverluste bis zu den Verbrauchern auszugleichen. Danach wurden die Verbraucher schrittweise zugeschaltet und die Spannungen an der Verteilung sowie am LED-Ring kontrolliert. Am Streifenanfang wurden 5,05 V und am Streifenende 5,06 V gemessen. Die gemessenen Stromwerte für Vollweiss, Rot und Grün können dem Kapitel Tests entnommen werden.

Nach der Spannungsprüfung wurden Raspberry Pi 5, die drei Kameras und der LED-Controller in Betrieb genommen. Gesteuert wurde der Ring dafür über die Bedienoberfläche des Controllers im Netz. Eigene Lichteffekte gab es zu diesem Zeitpunkt noch nicht. Dabei wurde geprüft, ob die Dartscheibe gleichmässig ausgeleuchtet wird und ob keine auffällige Erwärmung oder instabile Versorgung auftritt. Der Raspberry Pi 5 zeigte unter Last keine Unterspannungsmeldung.

Details zur Inbetriebnahme können dem Testprotokoll P-01 Inbetriebnahme im Anhang entnommen werden.

8.5.6 Abschluss der Phase

Mit der Inbetriebnahme und dem Sicherstellen der korrekten Funktionsweise des Systems, sind Phase 1 – Energieversorgung/Beleuchtung und Phase 2 – mechanischer Aufbau abgeschlossen. Sobald die Kalibrierung steht, kann diese durchgeführt und abgespeichert werden. Alle folgenden Funktionstests des Programmes, können am Endaufbau getestet werden. Unmittelbar löst diese Phase keine Anforderung ein. Sie schafft die Voraussetzung für A1 bis A5: Ohne feste und reproduzierbare Lage der Kameras ist keine gültige Kalibrierung möglich und damit keine Wertung.

8.6 Arbeitsumgebung der Softwarephasen

Mit Phase 3 verlagert sich die Arbeit vom Aufbau in die Software. Damit die folgenden Phasen gleich beschrieben werden können, wird hier einmal festgehalten, wo entwickelt wurde, wie der Stand auf die Rechner kam, mit welchen Hilfsmitteln gearbeitet wurde und wie bei Fehlern vorgegangen wurde.

Zwei Orte

Entwickelt wurde auf einem Laptop, gelaufen sind die Programme auf der Anlage. Auf dem Laptop steht dieselbe Grundlage wie auf beiden Rechnern: Python, dazu die in der Evaluation gewählte Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV für die Erkennung und das Oberflächenwerkzeug PyQt6 für die Anzeige. Jeder Programmteil lässt sich dadurch am Laptop ausführen und prüfen, bevor er auf sein Gerät kommt.
Für die Erkennung liessen sich die Kameras vor dem Aufbau unmittelbar am Laptop anschliessen. Die Arbeit an der Bildauswertung konnte damit beginnen, bevor Energieversorgung und Mechanik standen. Am Laptop entstanden der Aufbau des Programms und die Kalibrierversuche. Den fertigen Aufbau verlangt erst die endgültige Kalibrier-Aufnahme.
Für die Anzeige gilt dasselbe. Die Oberfläche läuft am Laptop in einem Fenster statt im Vollbild des Touch-Displays und anstelle der Verbindung zur Erkennungseinheit speisen eingebaute Beispieldaten den Spielstand. Aufbau, Gestaltung und Bedienablauf liessen sich so entwerfen und bedienen, bevor Anzeigerechner und Display verbaut waren.
Die Softwarephasen liefen damit in ihren Grundzügen bereits vor den Phasen 1 und 2 an.



Abbildung 37: provisorischer Aufbau

Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung dient Visual Studio Code. Das KI-gestützte Werkzeug Claude Code ist darin eingebettet und arbeitet unmittelbar im geöffneten Quelltextarchiv.

Der Weg auf die Rechner

Die Anlage trägt zwei getrennte Anwendungen und entsprechend bestehen zwei Quelltextarchive. Beide sind nach Quelltext, Konfiguration, Hilfsskripten und Prüffällen gegliedert.

Archiv	Was übertragen wird	Zielordner auf dem Gerät
Erkennungseinheit	Quelltext, Konfiguration & Hilfsskripte	Projektordner auf dem Hauptrechner
Anzeigeeinheit	Quelltext, Oberflächenteile, Bilddateien & Abhängigkeitsliste	Projektordner auf der Anzeigeeinheit

Tabelle 58: Die beiden Quelltextarchive

Übertragen wird über das Funknetz, danach wird der zugehörige Dienst neu gestartet. Die vollständigen Befehle stehen in der Befehlsreferenz im Anhang.

Versionsverwaltung ab Phase 3

Mit dem Beginn der Softwarearbeit läuft die Versionsverwaltung mit. Das ist die Massnahme gegen Risiko R8, nach der kein Rückschritt unumkehrbar sein darf.
Die Reihenfolge ist in allen Phasen dieselbe: Vor jedem Aufspielen laufen die Prüffälle und vor jeder beauftragten Änderung wird der geprüfte Stand festgeschrieben und markiert. Diese Markierung ist der Rückfallpunkt.

Die Sicht auf das Kamerabild

Für die Arbeit am Bild dient ein Fenster, das die Livebilder der drei Kameras zeigt. In ihm wird sichtbar, was die Erkennung sieht: das entzerrte Bild, der Unterschied zum leeren Board und die gefundenen Umrisse. Im selben Fenster werden in Phase 3 die Kalibrierpunkte je Kamera von Hand gesetzt.
Wo das Fenster erscheint, hat sich im Lauf der Arbeit geändert. Solange die Kameras am Laptop hingen, öffnete es sich dort unmittelbar. Sobald sie im Ring am Aufbau sassen, lief das Programm auf dem Hauptrechner. Von da an wurde das Fenster über eine Bildschirmfernwartung mit VNC vom Laptop aus betrachtet, weshalb der Hauptrechner die Betriebssystemfassung mit grafischer Oberfläche trägt.
Sechzehn Tasten im Fenster erlauben es, Erkennung und Spiellogik während der Entwicklung von Hand zu steuern. Die Belegung steht in der Befehlsreferenz im Anhang. Im Spielbetrieb werden weder das Fenster noch die Fernwartung gebraucht. Bedient wird die Anlage über das Touch-Display.

Vorgehen bei Fehlern

Die Fehler, die in den Phasen 3 bis 6 beschrieben werden, sind in derselben Reihenfolge bearbeitet worden. Am Anfang steht der Befund: was beobachtbar auftrat, möglichst wiederholbar und mit einem Messwert festgehalten. Darauf folgt die Eingrenzung aus den Daten, die bereits aufgezeichnet waren, wobei jede Vermutung so formuliert wurde, dass eine Messung sie widerlegen kann. Wo danach mehrere Wege in Frage kamen, sind die verworfenen mit ihrem Grund genannt. Zuletzt die Umsetzung, zusammen mit dem Nachweis ihrer Wirkung.
Geändert wurde erst nach dem Messen. Weshalb diese Reihenfolge nötig war, steht in den Lessons learnt.

8.7 Phase 3 – Kalibrierung

Die Kalibrierung stellt die Verbindung zwischen Kamerabild und Dartscheibe her. Ohne sie ist ein erkannter Pfeil nur ein heller Fleck an einer Pixelposition. Erst die Kalibrierung macht daraus eine Stelle auf der Scheibe, der sich ein Wertungsfeld zuordnen lässt.
Die Phase steht nach dem Aufbau und das hat zwei zwingende Gründe. Eine Kalibrierung gilt für genau die Geometrie, in der sie aufgenommen wurde. Verschiebt sich eine Kamera danach, ist sie ungültig. Und die Kalibrierbilder müssen unter derselben Beleuchtung entstehen wie der spätere Spielbetrieb, also unter dem auf Vollweiss geschalteten LED-Ring. Deshalb gehören Phase 1 und Phase 2 vollständig abgeschlossen vor der endgültigen Kalibrier-Aufnahme.

8.7.1 Recherche

Die Aufgabe liess sich zu Beginn nur als Frage formulieren: Wie wird aus dem Bild einer Kamera eine Position auf der Dartscheibe? Weder die Bildauswertung noch die Zusammenführung mehrerer Kameraansichten waren Bestandteil des Bildungsgangs. Der Aufbau der Software wurde deshalb vorgängig durch Recherche ermittelt, bevor eine Zeile Programm entstand.

Zwei Probleme, getrennte Lösungen

Die Recherche ergab als erstes, dass in der Frage zwei verschiedene Probleme stecken, die nichts miteinander zu tun haben und je ein eigenes Verfahren verlangen.
Das erste Problem liegt im Objektiv. Eine Linse bildet gerade Linien zum Bildrand hin gekrümmt ab. Eine Tischkante erscheint als leichter Bogen. Das ist eine Eigenschaft der Kamera allein und unabhängig davon, worauf sie gerichtet ist.
Das zweite Problem liegt in der Blickrichtung. Die Kameras sitzen im Ring um die Scheibe und schauen schräg auf sie. Ein Kreis erscheint dadurch als Ellipse und gleich grosse Felder erscheinen verschieden gross. Das ist eine Eigenschaft der Aufstellung, nicht der Kamera.

Problem	Woher es kommt	Verfahren
Gerade Linien erscheinen gekrümmt	Objektiv	Kamera einmalig mit einem Schachbrettmuster vermessen
Die Scheibe erscheint verzerrt	schräge Blickrichtung auf eine Ebene	Abbildung zwischen zwei Ebenen, aus bekannten Punktpaaren berechnet

Tabelle 59: Kalibrierung - Probleme

Beide Verfahren sind in der Bildverarbeitung seit Jahrzehnten gebräuchlich und in der gewählten Programmbibliothek vorhanden. Sie mussten somit nur richtig angewendet werden.

Eine Grenze

Die Recherche ergab noch einen zweiten Befund: Eine schräg aufgenommene Fläche kann gerade dargestellt werden. Verzerrungen, die je nach Position unterschiedlich stark sind, können damit aber nicht vollständig korrigiert werden.

Darum müssen die vorgegebenen Sollpositionen zueinander passen. Sind diese widersprüchlich, kann die Berechnung den Fehler nicht richtig ausgleichen und verteilt ihn auf die verschiedenen Punkte. Genau dieses Verhalten trat später auf und wird weiter unten beschrieben.

8.7.2 Geplanter Aufbau — die Funktionsblöcke

Vor der Umsetzung wurde die Kalibrierung in sieben abgegrenzte Funktionsblöcke unterteilt. Jeder Block hat eine Aufgabe und ein überprüfbares Ergebnis. Erst dadurch liess sich die Arbeit schrittweise und einzeln prüfbar ausführen.

Kalibrierung – die Sieben Funktionsblöcke

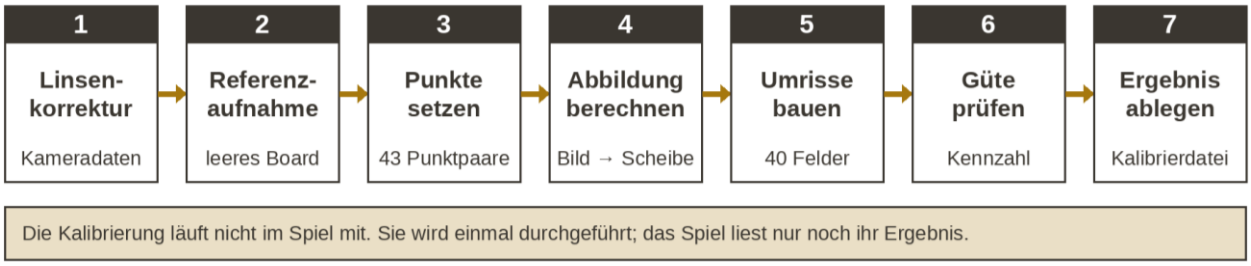


Abbildung 38: Kalibrierung - 7 Funktionsblöcke

Block	Aufgabe	Ergebnis
1	Objektivverzeichnung vermessen und Bild entzerren	Kameradaten je Kamera
2	Aufnahme des leeren Boards unter Vollweiss, je Kamera	Referenzbild
3	Punkte im Bild setzen, deren Lage auf der Scheibe bekannt ist	43 Punktpaare je Kamera
4	Aus den Punktpaaren die Abbildung Bild → Scheibe berechnen	Abbildungsvorschrift je Kamera
5	Aus den gesetzten Kanten die Umrisse der Wertungsfelder konstruieren und auf das wirkliche Board ziehen	40 Feldumrisse je Kamera
6	Güte prüfen: wie weit liegen die Punkte nach der Rechnung daneben	Kennzahl je Kamera
7	Alles in einer Datei ablegen, aus der das Spiel liest	eine Kalibrierdatei

Tabelle 60: Kalibrierung - Funktionsblöcke

Diese Blöcke wurden einzeln und in dieser Reihenfolge an Claude Code übergeben und umgesetzt, jeweils direkt in der Entwicklungsumgebung (VS). Vorgaben, Integration und Prüfung jedes Blocks lagen beim Verfasser.

8.7.3 Die einzelnen Schritte

Schritt 1 — Die Objektivverzeichnung vermessen

Jede der drei Kameras wird einmalig mit einem Schachbrettmuster vermessen. Verwendet wird ein ausgedrucktes und auf eine ebene Unterlage geklebtes Schachbrett mit 7×10 Feldern von je 27×27 mm, nachgemessen mit dem Messschieber. Das Muster wird in verschiedenen Lagen vor die Kamera gehalten und mehrfach aufgenommen.
Aus den Aufnahmen rechnet das Verfahren zwei Dinge aus: wie das Objektiv abbildet und wie stark es krümmt. Beide Angaben werden je Kamera abgelegt und im Betrieb auf jedes Einzelbild angewandt.
Eine Umrechnung ist dabei zu beachten, weil sie leicht zu einer Verwechslung führt. Gezählt werden nicht die Felder, sondern die inneren Eckpunkte des Musters: Sieben mal zehn Felder ergeben sechs mal neun innere Ecken. Beide Angaben bezeichnen dasselbe Muster.

Als Gütemass fällt der Reprojektionsfehler an. Der mittlere Abstand zwischen den tatsächlich gemessenen Musterecken und den Positionen, die die Rechnung dafür vorhersagt. Je kleiner, desto besser beschreibt das Modell die Kamera.

Kamera	Reprojektionsfehler
Kamera 1	0,804 Bildpunkte
Kamera 2	0,638 Bildpunkte
Kamera 3	0,718 Bildpunkte

Tabelle 61: Kalibrierung - Kameras

Alle drei liegen unter einem Bildpunkt. Damit scheidet die Objektivverzeichnung als Erklärung für spätere Wertungsfehler aus. Ein Schluss, der bei der Fehlersuche in Phase 4 gebraucht wurde.
Festzuhalten ist, was dieser Schritt nicht liefert: Er entzerrt das Bild, legt aber keinen Massstab fest. Der Massstab entsteht erst mit den gesetzten Punkten und der daraus gerechneten Abbildung, über die bekannte Grösse der Dartscheibe.

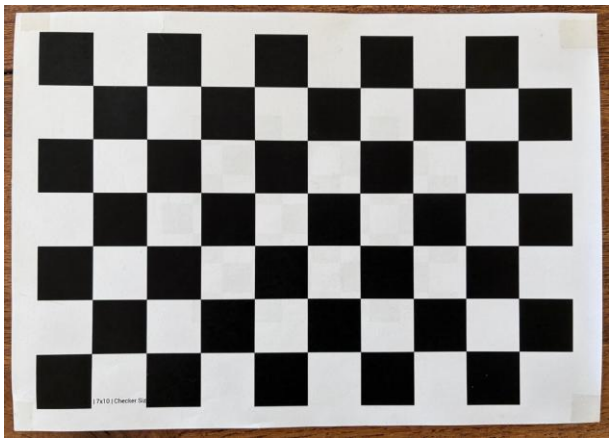


Abbildung 39: Schachbrettmuster

Schritt 2 — Referenzaufnahme des leeren Boards

Je Kamera wird eine Aufnahme der leeren Scheibe gemacht, unter der Beleuchtung, unter der später gespielt wird. Diese Aufnahme ist die Grundlage für alles Weitere: Auf ihr werden die Kalibrierpunkte gesetzt und sie dient im Spielbetrieb als Vergleichsbild, gegen das Veränderungen erkannt werden.

Schritt 3 — Die 43 Kalibrierpunkte setzen

Jetzt folgt der einzige Schritt, der von Hand ausgeführt wird. Im entzerrten Bild werden Punkte angeklickt, deren Lage auf der Scheibe bekannt ist. Jeder Klick erzeugt ein Paar: eine Position im Bild und die zugehörige Sollposition auf der Scheibe.

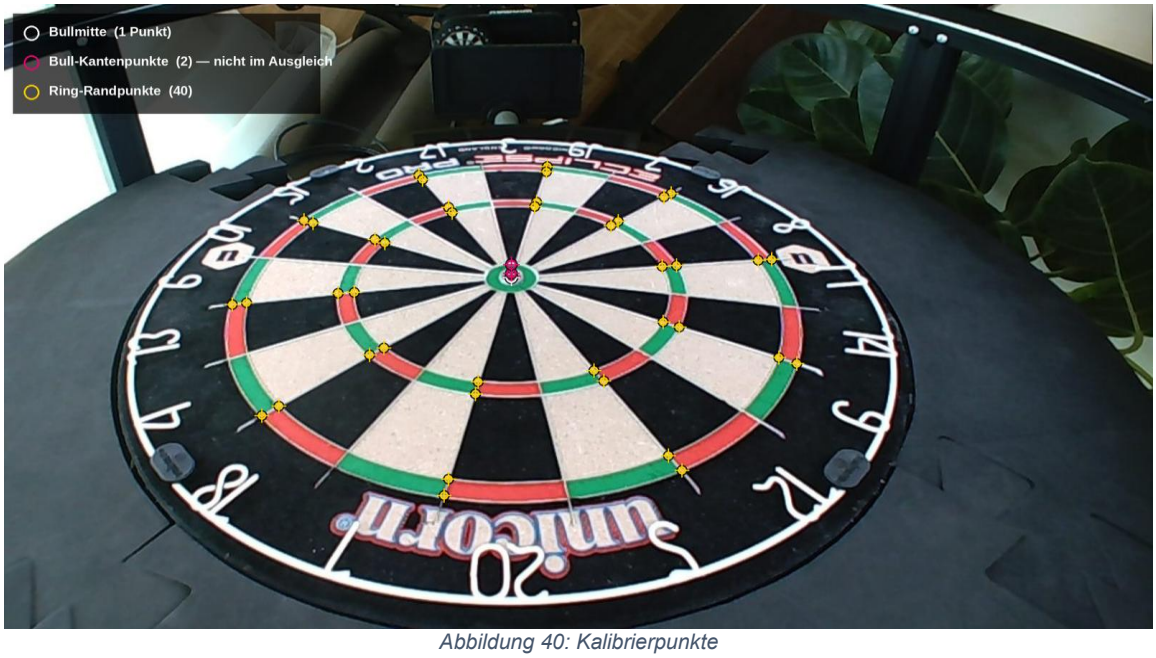


Abbildung 40: Kalibrierpunkte

Punktart	Anzahl
Mitte des Bulls	1
Kantenpunkte am Bullrand	2
Innen- und Aussenkante des Doppelrings	20
Innen- und Aussenkante des Dreifachrings	20

Tabelle 62: Kalibrierung - Kalibrierpunkte

Die Ringkanten werden nicht beliebig angeklickt, sondern entlang von zehn über die Scheibe verteilten Segmentgrenzen: 20/1, 3/19, 7/16, 8/11, 14/9, 12/5, 18/4, 13/6, 10/15 und 2/17. Dadurch verteilen sich die Punkte gleichmässig über die ganze Fläche und keine Richtung bleibt ohne Stützstelle.

Schritt 4 — Die Abbildung berechnen

Aus den 43 Punktpaaren wird die Abbildung berechnet, die das Bild auf die Ebene der Scheibe legt. Sie wird nicht exakt durch alle Punkte gelegt, das ginge nur bei fehlerfreien Klicks, sondern als bester Ausgleich über alle Paare. Der verbleibende mittlere Abstand ist wieder der Reprojektionsfehler und damit die Kennzahl, an der die Güte der Kalibrierung abzulesen ist.
Für das Verständnis der späteren Wertung ist eine Eigenheit wichtig: Beim Werten wird nicht gegen Normmasse gerechnet, sondern rein geometrisch geprüft, ob der Treffpunkt innerhalb eines Feldumrisses liegt. Ein Fehler in den Sollvorgaben zeigt sich deshalb nicht als sichtbare Abweichung, sondern verformt die Umrisse, gegen die später geprüft wird.

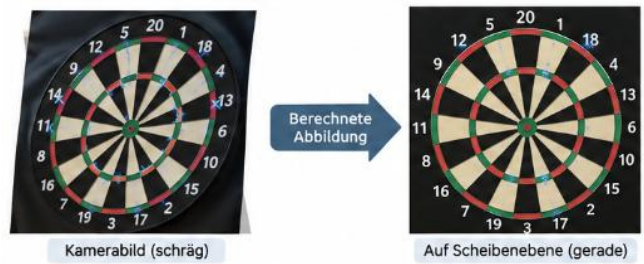


Abbildung 41: Abbildung berechnen

Schritt 5 — Die Feldumrisse konstruieren

Aus den gesetzten Ringkanten werden die Umrisse der Wertungsfelder konstruiert: je Kamera 20 Doppelfelder und 20 Dreifachfelder, zusammen 40, über drei Kameras 120. Sie sind das, wogegen im Spiel jeder Treffpunkt geprüft wird.

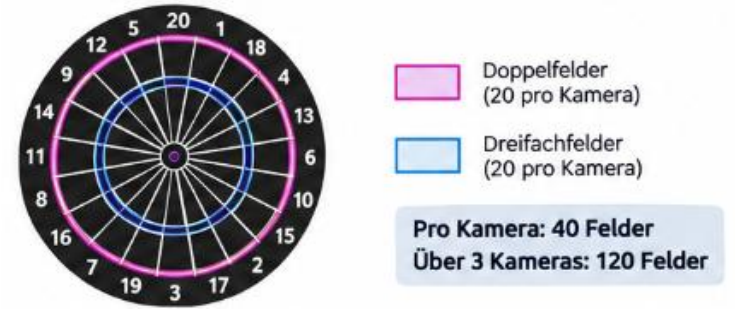


Abbildung 42: Feldumrisse konstruieren

Schritt 6 — Die Güte prüfen

Vor der Ablage wird gemessen, wie gut die gerechnete Abbildung die gesetzten Punkte trifft. Dazu werden die 43 Sollpositionen über die fertige Abbildung zurück ins Bild gerechnet und mit den tatsächlich geklickten Stellen verglichen. Der mittlere Abstand ist die Kennzahl je Kamera. Sie steht unter «Ergebnis und bekannte Grenzen».

Diese Kennzahl heisst wie die aus Schritt 1 und ist eine andere. Die aus Schritt 1 misst das Objektivmodell gegen die Ecken des Schachbretts und liegt unter einem Bildpunkt. Die hier gemessene prüft die Abbildung Bild → Scheibe gegen die von Hand gesetzten Punkte und liegt bei rund anderthalb Bildpunkten. Der Unterschied ist keine Verschlechterung, sondern die Folge davon, dass hier die Genauigkeit des Klickens mit eingeht: Beide Zahlen beantworten verschiedene Fragen und sind nicht gegeneinander zu lesen.

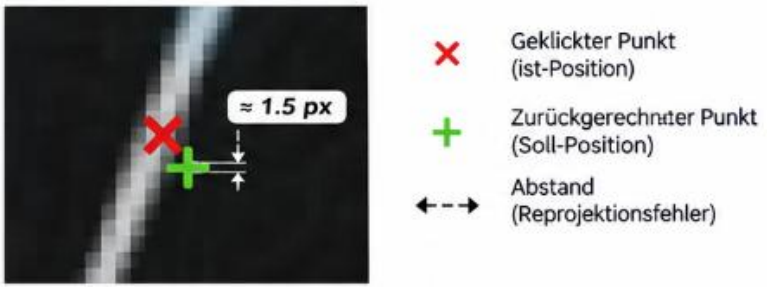


Abbildung 43: Güte prüfen

Schritt 7 — Das Ergebnis ablegen

Alle Ergebnisse gehen in eine einzige Kalibrierdatei. Das Spiel liest sie beim Start und rührt sie danach nicht mehr an. Die Kalibrierung läuft also nicht im Spielbetrieb mit. Sie ist ein eigener Arbeitsgang, der einmal durchgeführt wird und danach gilt, solange sich am Aufbau nichts ändert.

8.7.4 Was dabei schiefging

Die Kalibrierung ist der Teil der Software, an dem die meisten und die am schwersten auffindbaren Fehler aufgetreten sind. Alle drei wurden erst im Betrieb bemerkt, keiner davon als offensichtlich falscher Wert.

Erster Fehler: Werkzeug und Spiel rechneten in verschiedenen Bildern

Der grundsätzlichste Fehler betraf nicht die Zahlen, sondern die Voraussetzung, unter der sie überhaupt gelten: dass Kalibrierwerkzeug und Spielbetrieb dasselbe Bild sehen.
Sie taten es nicht. Ein Bild lässt sich auf zwei Arten entzerren. Entweder werden die am Rand entstehenden schwarzen Bereiche weggeschnitten, oder das volle Bildfeld bleibt mit schwarzen Rändern erhalten. Das Kalibrierwerkzeug schnitt weg, der Spielbetrieb nicht. Damit galt die berechnete Abbildung für ein anderes Bild als dasjenige, auf das sie angewandt wurde. Hinzu kam, dass bereits entzerrt gespeicherte Bilder im Werkzeug ein zweites Mal entzerrt wurden.
Die Wirkung war nicht, dass die Wertung erkennbar danebenlag. Der aus der Abbildung berechnete Bereich, in dem überhaupt nach Pfeilen gesucht wird, lag versetzt über dem Livebild und filterte echte Pfeilpixel weg, bevor die Suche sie zu sehen bekam. Der Fehler äusserte sich als Erkennungsschwäche und wurde entsprechend zunächst an der falschen Stelle gesucht.
Behoben wurde er nicht durch eine Korrekturrechnung, sondern durch Vereinheitlichung: Beide Wege verwenden seither dieselbe Bildaufbereitung. Zusätzlich wurde ein automatisierter Test angelegt, der genau diese Übereinstimmung prüft.

Zweiter Fehler: gerundete statt normgerechte Sollvorgaben

Die Sollpositionen der Ringkanten waren auf runde Zahlen gesetzt statt auf die Masse der Turniernorm. Alle Radiusangaben beziehen sich dabei auf den äusseren Rand des Doppelrings, der auf einer Turnierscheibe 170 mm vom Mittelpunkt entfernt liegt. Dieser Rand hat den Wert 1,0.

Kante	verwendet	Norm	Abweichung
Innen-Bull	0,0400	0,0374	+0,5 mm
Aussen-Bull	0,1000	0,0935	+1,1 mm
Dreifach innen	0,5500	0,5824	−5,5 mm
Dreifach aussen	0,6000	0,6294	−5,0 mm
Doppel innen	0,9200	0,9529	−5,6 mm
Doppel aussen	1,0000	1,0000	0

Tabelle 63: Kalibrierung - Kanten

Bei einer Ringbreite von 8 mm sind Abweichungen von 5,0 bis 5,6 mm bis zu 70 Prozent der Ringbreite. Die Vorgabe lag damit teilweise ausserhalb des Rings, den sie bezeichnen sollte.

Dritter Fehler: zwei Punkte mit falscher Richtung

Die beiden Kantenpunkte am Bullrand erhielten als Sollrichtung die Richtung zu Segment 20. Angeklickt wird aber der obere Bullrand im Kamerabild und weil die drei Kameras um 120 Grad versetzt stehen, bedeutet «oben im Bild» für jede Kamera eine andere Richtung auf der Scheibe.
Die gemessenen Einzelfehler dieser beiden Punkte lagen bei 24 bis 32 Bildpunkten, gegenüber unter 7 Bildpunkten bei allen übrigen 41. Hier wirkte die Grenze, die schon die Recherche gezeigt hatte: Eine Ebenenabbildung kann keine widersprüchlichen Vorgaben erfüllen. Sie verteilt den Widerspruch richtungsabhängig über alle Punkte. Es entsteht kein gleichmässiger Versatz, den man bemerken würde, sondern es entstehen einzelne schwache Bereiche auf der Scheibe. Im Betrieb beobachtet in den Segmenten 9, 11 und 14.

8.7.5 Die Korrektur und ihre Wirkung

Die Korrektur bestand aus drei Massnahmen. Die Sollmasse werden seither aus einer einzigen Stelle bezogen, die zugleich Kalibrierung und Wertung versorgt . Damit können beide nicht mehr auseinanderlaufen. Die beiden Kantenpunkte am Bullrand werden weiterhin gesetzt und gespeichert, gehen aber nicht mehr in den Ausgleich ein. Abbildung, Ringradien und alle Feldumrisse wurden aus den vorhandenen Klickpunkten neu berechnet. Kein einziger neuer Klick war nötig, weil nur die Sollzuordnung falsch war, nicht die Bildkoordinaten.
Die Wirkung wurde getrennt nach den beiden Fehlern gerechnet. Die mittlere Spalte zeigt den Stand, als erst die Sollmasse berichtigt waren und die beiden Punkte am Bullrand noch im Ausgleich lagen. Ein Bildpunkt entspricht rund zwei Dritteln eines Millimeters auf der Scheibe.

Kamera	vorher	nur Sollmasse	beide Fehler behoben
Kamera 1	7,15 px	5,65 px	1,51 px — rund 1,0 mm
Kamera 2	6,15 px	4,89 px	1,95 px — rund 1,3 mm
Kamera 3	6,00 px	4,64 px	1,72 px — rund 1,2 mm

Tabelle 64: Kalibrierung - Korrekturen

Die Trennung ist aufschlussreich: Die Berichtigung der Sollmasse allein hätte den Fehler nur um rund ein Fünftel gesenkt. Erst zusammen mit dem Ausschluss der beiden falsch zugeordneten Punkte fällt er um mehr als das Dreifache.

8.7.6 Ergebnis und bekannte Grenzen

Die gespeicherte Kalibrierung weist je Kamera den erwarteten Wert aus.

Kamera	Reprojektionsfehler
Kamera 1	1,513 px
Kamera 2	1,954 px
Kamera 3	1,715 px

Tabelle 65: Kalibrierung - Ergebnisse

Auch die aus der Kalibrierung hervorgehenden Ringradien liegen normgerecht.

Ring	Kamera 1	Kamera 2	Kamera 3	Norm
Doppel aussen	1,00192	1,00568	1,00211	1,0000
Doppel innen	0,95087	0,94767	0,95100	0,9529
Dreifach aussen	0,63356	0,63375	0,63045	0,6294
Dreifach innen	0,57526	0,57511	0,57476	0,5824
Aussen-Bull	0,09033	0,08775	0,07716	0,0935
Innen-Bull	0,02954	0,02870	0,03515	0,0374

Tabelle 66: Kalibrierung - Ergebnisse

Die vier äusseren Ringe treffen die Norm über alle drei Kameras auf wenige Tausendstel. Bezogen auf 170 mm bleiben Doppelring und Dreifach-Aussenkante unter einem Millimeter; am weitesten liegt die Dreifach-Innenkante daneben, bei allen drei Kameras um 1,2 bis 1,3 mm nach innen.

Die beiden Bull-Radien verhalten sich anders. Sie streuen deutlich stärker und liegen bei allen drei Kameras unter der Norm. Die Abweichung ist damit nicht zufällig verteilt, sondern geht systematisch in eine Richtung. Die Ursache liegt in einem ungenau gesetzten Kalibrierpunkt am Bullrand. Für die Wertung heisst ein zu klein gesetzter Bull-Radius, dass die Grenze des Bull-Bereichs näher am Mittelpunkt liegt, als sie liegen sollte. Der Befund ist als Verbesserung für den zweiten Prototyp erfasst. Am System wurde während der Diplomarbeit nichts mehr geändert.
Abschliessend wurde die Geometrie am Gegenstand verifiziert, indem Pfeile an bekannten Drahtkanten gesetzt wurden. In den Segmenten 3 und 14 stimmt sie über Dreifach- und Doppelring hinweg auf unter einen Millimeter.

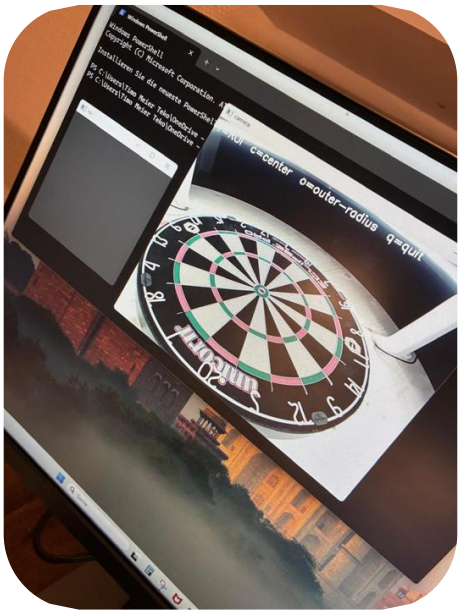


Abbildung 44: Bildschirm - Kalibrierung

8.7.7 Abschluss der Phase

Die Phase ist abgeschlossen. Alle drei Kameras sind vermessen und auf die Scheibe ausgerichtet, die Feldumrisse liegen vor und die Güte ist je Kamera mit einer Kennzahl belegt. Der verbleibende mittlere Fehler von rund einem Millimeter liegt deutlich unter der Breite eines Dreifachrings von 8 mm. Die Kalibrierung ist damit genau genug, um zwischen benachbarten Wertungsfeldern zu unterscheiden.
Die drei gefundenen Fehler sind behoben und, soweit möglich, durch automatisierte Tests gegen ein unbemerktes Wiederauftreten abgesichert. Damit liegt die Grundlage vor, auf der die eigentliche Erkennung in Phase 4 aufbaut. Auch diese Phase löst keine Anforderung unmittelbar ein. Sie schafft die Umrechnung vom Bildpunkt in Segment und Ring, ohne die A1 und A2 nicht erreichbar sind.

8.8 Phase 4 – Erkennung und Wertung

Diese Phase macht aus der kalibrierten Geometrie einen Punktestand. Die Kalibrierung sagt, welche Stelle auf der Scheibe zu welcher Stelle im Kamerabild gehört. Sie sagt nicht, wo ein Pfeil steckt. Genau das ist hier zu lösen: aus drei laufenden Kamerabildern eine Position bestimmen, ihr ein Wertungsfeld zuordnen und daraus einen Spielstand führen, ohne dass jemand eine Taste drückt.
Die Phase baut vollständig auf Phase 3 auf. Jede Rechnung dieser Phase setzt voraus, dass die Abbildung Bild → Scheibe gilt. Verschiebt sich eine Kamera, ist nicht die Erkennung falsch, sondern ihre Grundlage.

8.8.1 Recherche

Mit zusätzlicher Sensorik oder mit dem Bild allein

Dass mit Kameras erkannt wird, gibt der Auftrag vor. Offen war, ob die drei Kameras allein genügen oder ob zusätzliche Sensorik am Board nötig ist, um das Entfernen der Darts sicher zu erkennen.

Weg	Was dafür spricht	Was dagegen spricht
Taster oder Lichtschranke	Zuverlässig, einfache Auswertung	Zusätzliche Sensorik und Verdrahtung am Board. Die Baugrösse des Aufbaus ist damit nicht vorhersehbar
Rein bildgestützte Erkennung	Keine zusätzliche Sensorik, keine Eingriffe am Board	Höhere Anforderungen an die Bildauswertung

Tabelle 67: Erkennung und Wertung - Recherche

Resultat: Gewählt wurde der Verzicht auf zusätzliche Sensorik. Sie passt besser zum geplanten Aufbau, da keine zusätzlichen Sensoren oder Leitungen am Dartboard notwendig sind und die bestehende Geometrie des Boards unverändert bleibt. Der höhere Aufwand bei der Bildauswertung wird dafür bewusst in Kauf genommen, da die Erkennung vollständig über die drei Kameras erfolgen kann.

Die Kette vom Bild zur Wertung

Aus der Recherche ging der Ablauf hervor, der die ganze Phase trägt: Kamerabilder erfassen, sie mit einem Hintergrundbild vergleichen, aus der veränderten Fläche die Achse des Darts und seinen Auftreffpunkt bestimmen, die Blickrichtungen der Kameras auf der Scheibenebene zusammenführen und die Position über Radius und Winkel werten.
Diese Kette ist nicht neu erfunden, sondern aus der Literatur zur Bildverarbeitung übernommen. Jeder einzelne Schritt ist ein gebräuchliches Verfahren.

Eine Eigenschaft, die alles Weitere bestimmt

Ein Punkt der Recherche verdient eine eigene Erwähnung, weil er den Aufbau und später den schwersten Fehler der Phase erklärt.
Eine einzelne Kamera bestimmt keinen Punkt, sondern eine Gerade. Das Kamerabild ist zweidimensional. Die Tiefe entlang der Blickrichtung geht beim Abbilden verloren. Was die Kamera liefert, ist die Aussage: der Pfeil liegt irgendwo auf dieser Linie. Erst wenn zwei Kameras dieselbe Szene aus verschiedenen Richtungen sehen, schneiden sich ihre beiden Geraden in einem Punkt und dieser Schnitt ist die gesuchte Position.

Daraus folgen zwei Dinge. Erstens braucht das System mindestens zwei Kameras, die denselben Pfeil sehen. Zweitens und das hat sich erst im Betrieb gezeigt, ist eine Gerade nur so gut wie die Richtung, aus der sie bestimmt wurde. Zeigt ein Pfeil annähernd auf eine Kamera zu, erscheint er dort nicht als Strecke, sondern als kurzer Fleck. Seine Richtung ist dann nicht mehr bestimmbar und die Schätzung rutscht entlang der Geraden davon.

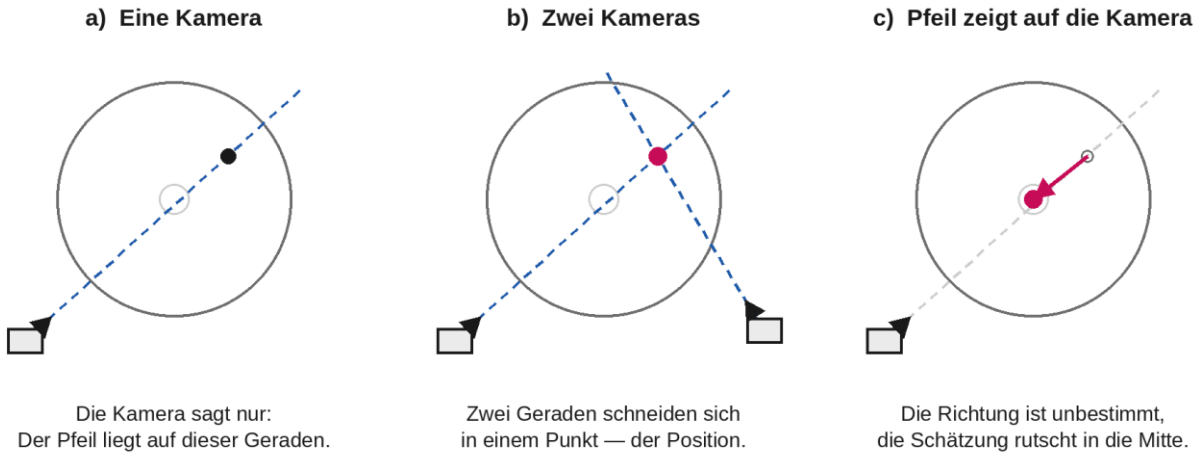


Abbildung 45: Erkennung grafisch

8.8.2 Geplanter Aufbau — die Funktionsblöcke

Wie in Phase 3 wurde die Aufgabe vor der Umsetzung in abgegrenzte Funktionsblöcke unterteilt. Acht Blöcke, jeder mit einer Aufgabe und einem überprüfbaren Ergebnis.

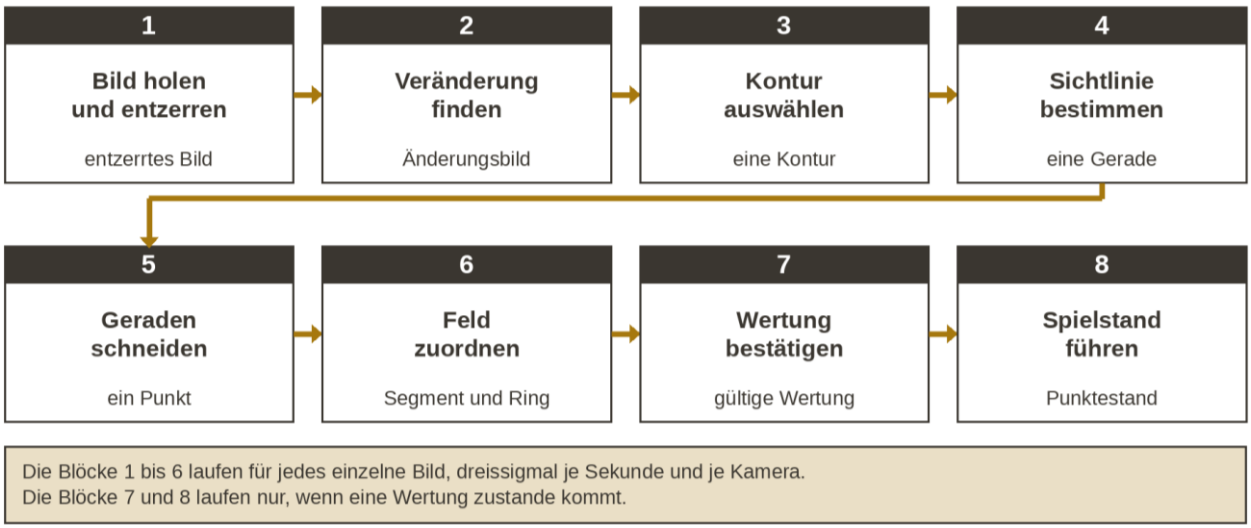


Abbildung 46: Erkennung & Wertung: Funktionsblöcke

Block	Aufgabe	Ergebnis
1	Kamerabild lesen und mit den Kameradaten entzerren	ein entzerrtes Bild je Kamera
2	Das Bild mit dem Hintergrundbild vergleichen	Schwarzweissbild der veränderten Stellen
3	Aus den veränderten Stellen die auswählen, die wie ein Pfeil aussehen	eine Kontur je Kamera
4	Die Achse der Kontur auf die Scheibenebene übertragen	eine Gerade je Kamera
5	Die Geraden schneiden	ein Punkt auf der Scheibe
6	Den Punkt gegen die Feldumrisse prüfen	Segment und Ring
7	Prüfen, ob die Wertung gilt	eine bestätigte Wertung
8	Die Wertung in den Spielstand überführen	Punktestand, Überwurf, Sieg

Tabelle 68: Erkennung und Wertung - Funktionsblöcke

Auch hier wurden die Blöcke einzeln und in dieser Reihenfolge an Claude Code übergeben und umgesetzt, jeweils direkt in der Entwicklungsumgebung. Vorgaben, Integration und Prüfung jedes Blocks lagen beim Verfasser.

8.8.3 Die einzelnen Schritte

Schritt 1 — Das Bild aufbereiten

Die drei Kameras liefern je 1280×720 Bildpunkte mit 30 Bildern je Sekunde. Jedes Bild wird mit den in Phase 3 bestimmten Kameradaten entzerrt, auf Graustufen reduziert und mit einem Weichzeichner über 5×5 Bildpunkte geglättet. Der Weichzeichner nimmt dem Bild das Rauschen des Sensors, das sonst in jedem Vergleich als Veränderung erschiene.

Schritt 2 — Was sich gegenüber dem leeren Board verändert hat

Erkannt wird nicht der Pfeil, sondern die Veränderung. Beim Spielstart nimmt das System je Kamera ein Bild der leeren Scheibe auf. Drei Sekunden nach dem Aufhellen auf Vollweiss, damit das Licht steht. Dieses Bild ist der Hintergrund. Jedes neue Bild wird Bildpunkt für Bildpunkt davon abgezogen. Was übrig bleibt, ist die Veränderung.
Aus dem Differenzbild wird ein Schwarzweissbild: Alles über einer Helligkeitsschwelle gilt als verändert. Die Schwelle ist nicht fest. Das System versucht drei Werte (22, 35 und 55) und behält den, der die beste Kontur ergibt. Anschliessend laufen zwei Formoperationen darüber: ein Öffnen mit 3 × 3 Bildpunkten entfernt einzelne Störpunkte, ein Schliessen mit 5 × 5 Bildpunkten verbindet auseinandergerissene Teile eines Pfeilschafts. Der Öffnungsschritt ist bewusst kleiner als der Schliessschritt, weil er sonst die dünnen Schäfte selbst wegfrässe.
Bleiben weniger als 300 veränderte Bildpunkte übrig, gilt das Bild als unverändert und die Auswertung bricht ab. Das ist der Filter gegen Spiegelungen und Lichtschwankungen.
Zwei Hintergrundbilder werden geführt und die Unterscheidung ist für den ersten Fehler dieser Phase entscheidend. Das eine wird im Betrieb laufend leicht nachgezogen, damit langsame Lichtänderungen nicht als Veränderung erscheinen. In ihm wird ein steckender Pfeil nach kurzer Zeit zum Hintergrund. Das andere ist die unveränderte Aufnahme des leeren Boards und dient als Mass dafür, wie viel überhaupt im Board steckt.

Schritt 3 — Was wie ein Pfeil aussieht

Im Schwarzweissbild stehen jetzt alle veränderten Flächen. Eine davon ist der Pfeil, die übrigen sind Schatten, Hand, Spiegelungen. Sechs Prüfungen trennen sie.

Prüfung	Grenze	Wogegen sie schützt
Fläche der Kontur	40 bis 4000 Bildpunkte	Einzelne Störpunkte und grossflächige Veränderungen wie eine Hand
Länge	15 bis 500 Bildpunkte	Zu kleine und zu grosse Gebilde
Längenverhältnis	mindestens 2,0	Ein Pfeil ist langgestreckt. Runde Flächen fallen weg
Füllgrad	höchstens 0,98	Vollständig ausgefüllte Rechtecke sind keine Pfeile
Lage	innerhalb des 1,20-fachen Scheibenradius	Veränderungen ausserhalb der Scheibe
Zuversicht	mindestens 0,2	Konturen, die alle Masse knapp erfüllen

Tabelle 69: Erkennung und Wertung - Aussehen Pfeil

Das Längenverhältnis wird nicht am achsenparallelen Rechteck gemessen, sondern am gedrehten. Ein schräg liegender Schaft wird sonst bestraft, obwohl er genauso langgestreckt ist wie ein senkrechter. Bleiben mehrere Konturen übrig, zählt die mit der höchsten Zuversicht. Diese ergibt sich aus Fläche, Länge, Längenverhältnis und Füllgrad.

Schritt 4 — Von der Kontur zur Sichtlinie

Durch die gefundene Kontur wird eine Gerade gelegt. Die Achse des Pfeils im Bild. Mit der Abbildung aus Phase 3 werden zwei Punkte dieser Geraden auf die Scheibenebene übertragen. Die Verbindung der beiden Punkte ist die Sichtlinie der Kamera auf der Scheibe.

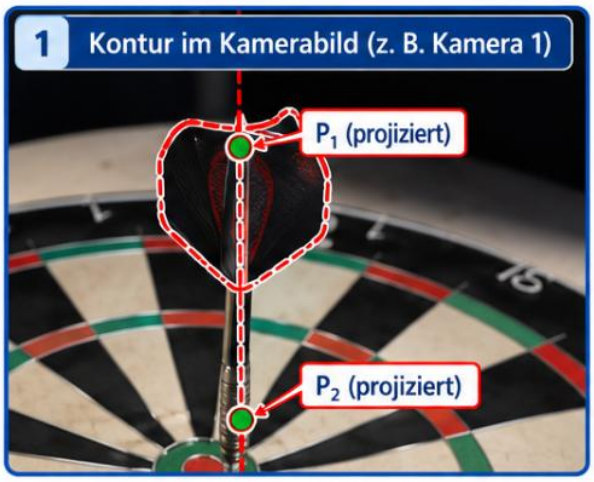


Abbildung 47: Projizierte Linie

Schritt 5 — Der Schnitt der Sichtlinien

Zwei oder drei Sichtlinien schneiden sich nur im Idealfall in einem Punkt. Gesucht wird deshalb der Punkt, der allen Geraden zusammen am nächsten liegt. Ein Ausgleich, kein exakter Schnitt. Die Kameras gehen dabei ungleich gewichtet ein, mit 0,6 für Kamera 1, 1,0 für Kamera 2 und 0,6 für Kamera 3.

Zwei Bedingungen entscheiden, ob das Ergebnis angenommen wird.

Bedingung	Wert	Was sie bedeutet
Mindestzahl Kameras	2	Mit einer Geraden allein gibt es keinen Schnitt
Grösster mittlerer Abstand	0,05	Liegen die Geraden im Mittel weiter vom Ergebnis entfernt, widersprechen sie einander und die Wertung unterbleibt

Tabelle 70: Erkennung und Wertung - Bedingungen

Der zweite Wert ist die einzige Selbstkontrolle der Rechnung und, wie sich zeigen sollte, bei zwei Kameras wirkungslos.

Schritt 6 — Vom Punkt zum Feld

Jetzt steht eine Position auf der Scheibe. Ihr ein Feld zuzuordnen geschieht auf zwei Wegen, je nach Bereich.

Bereich	Weg
Bull und Bullseye	Über den Abstand vom Mittelpunkt, gegen die Normmasse
Doppel- und Dreifachring	Über die in Phase 3 konstruierten Feldumrisse: Liegt der Punkt innerhalb eines der 40 Umrisse, gilt dieses Feld
Alles übrige	Über Abstand und Winkel, gegen die Normmasse

Tabelle 71: Erkennung und Wertung - Felder

Die Normmasse stehen an einer einzigen Stelle im Programm und versorgen Kalibrierung und Wertung gemeinsam. Diese Zusammenführung ist eine Folge des zweiten Fehlers aus Phase 3. Sie verhindert, dass beide Seiten wieder auseinanderlaufen.
Trifft der Punkt rechnerisch in einen Doppel- oder Dreifachring, liegt aber in keinem der konstruierten Umrisse, wird nicht verdoppelt oder verdreifacht, sondern das einfache Feld gewertet. Das ist die vorsichtige Auslegung: Im Zweifel die kleinere Wertung.

Schritt 7 — Wann eine Wertung gilt

Eine einzelne Positionsbestimmung genügt nicht. Während ein Pfeil fliegt und einsticht, schwankt die Schätzung. Erst danach steht sie still. Darum wird nicht ein Bild gewertet, sondern ein Fenster.

Grösse	Wert	Bedeutung
Fenster	8 Bilder	Über so viele Bilder wird zurückgeschaut
Geforderte Übereinstimmungen	4	So viele der Schätzungen im Fenster müssen beieinanderliegen
Grösste zulässige Bewegung	0,03	Als beieinander gilt, was innerhalb dieses Abstands liegt — rund 5 mm
Haltezeit je Kamera	4 Bilder	So lange gilt die letzte gültige Schätzung einer Kamera weiter, wenn sie kurz aussetzt

Tabelle 72: Erkennung und Wertung - Wertung

Das gleitende Fenster hat einen älteren Ansatz abgelöst, der vier aufeinanderfolgende übereinstimmende Bilder verlangte. Ein einziges gestörtes Bild setzte dort den Zähler zurück und kostete die Wertung. Die Haltezeit je Kamera wirkt in dieselbe Richtung: Ein kurzes Flackern einer Kamera nimmt sie nicht mehr aus der Zusammenführung.
Ist die Wertung stabil, folgt die Prüfung auf Wiederholung. Nach drei Pfeilen gilt die Aufnahme als beendet, und das System wartet, bis die Pfeile gezogen sind.

Schritt 8 — Von der Wertung zum Spielstand

Über der Erkennung sitzt die Spiellogik: X01 mit 301 oder 501 Punkten, wahlweise mit Doppel-Aus, für einen oder zwei Spieler. Sie zieht die gewertete Zahl vom Punktestand ab, führt Runden und Spielerwechsel und entscheidet über Überwurf und Sieg.
Ein Überwurf wird nicht rückwärts gerechnet, sondern durch Zurücksetzen auf den Stand vor der Aufnahme aufgelöst. Das ist unempfindlicher. Eine Rückrechnung müsste jede Sonderregel noch einmal in umgekehrter Richtung beherrschen, das Zurücksetzen muss nur den alten Stand kennen.

8.8.4 Was dabei schiefging

Die Erkennung ist der Teil des Projekts mit den meisten Fehlern und mit denen, die am schwersten zu finden waren. Keiner der drei nachstehenden Fehler zeigte sich als falsche Zahl. Alle drei zeigten sich als Verhalten, das im Spiel störte und dessen Ursache nicht dort lag, wo man zuerst suchte.
Das Vorgehen war in allen Fällen dasselbe: Der Befund wurde am Aufbau gemessen und protokolliert, daraus ein schriftlicher Auftrag mit Messbefund, Ursache, geforderter Änderung und ausdrücklich unveränderlichen Teilen formuliert, dieser Auftrag in der Entwicklungsumgebung an Claude übergeben und das Ergebnis am Aufbau nachgemessen.

Erster Fehler: Jeder Pfeil wurde zweimal gewertet

Der Befund war am Aufbau beliebig wiederholbar: Ein Pfeil wurde einmal beim Wurf gewertet und ein zweites Mal beim Herausziehen. Die beiden Positionen lagen 0,013 auseinander, also gut zwei Millimeter. Dort kann kein zweiter Pfeil gelandet sein.
Die Ursache liegt im laufend nachgeführten Hintergrundbild. Steckt ein Pfeil eine Weile im Board, wird er Teil des Hintergrunds. Zieht man ihn, zeigt der Hintergrund einen Pfeil und das Livebild keinen. Die

Differenz hat Pfeilform, besteht alle sechs Prüfungen aus Schritt 3 und wird als neue Wertung behandelt. Die Entfernungserkennung würde das Auflösen, braucht aber zehn ruhige Bilder und während des Ziehens ist die Hand im Bild.
Verborgen geblieben war der Fehler, weil er nach einer vollständigen Aufnahme nicht auftritt: Dort wartet das System ohnehin auf das Entfernen und verwirft neue Wertungen. Er tritt nur bei unvollständigen Aufnahmen auf. Ein oder zwei Pfeile, Fehlwurf, Abpraller und gerade dort ist er im Spiel besonders schädlich. Die Behebung brauchte vier Anläufe.

Anlauf	Annahme	Weshalb sie nicht trug
1	Eine Wertung nahe der letzten ist eine Wiederholung	Verwarf echte Würfe: Pfeile stecken schräg, die Einstichpunkte können enger beieinanderliegen, als der Schaftdurchmesser vermuten lässt
2	Entscheidend ist die veränderte Fläche gegenüber dem leeren Board, zusammen mit dem Abstand	Die Und-Verknüpfung war zu streng; in der Praxis entschied allein der Abstand, also das schwächere Merkmal
3	Die Fläche allein entscheidet	Richtig — aber der gespeicherte Vergleichswert wurde nach einer Ablehnung überschrieben und damit war beim nächsten Vergleich nichts mehr geschrumpft
4	Der Vergleichswert wird freigegeben, sobald das Board als leer gemeldet ist	Trägt

Tabelle 73: Erkennung und Wertung - Fehler 1

Das tragfähige Merkmal ist eine physikalische Aussage, kein Schwellwert: Landet ein weiterer Pfeil, wächst die veränderte Fläche gegenüber dem leeren Board. Wird ein Pfeil gezogen, schrumpft sie. Ein eng gesetzter Nachbarpfeil lässt sie immer wachsen, eine Geisterkontur tritt nur nach einem Schrumpfen auf.
Wie deutlich das Merkmal trennt, zeigen die protokollierten Werte eines Durchgangs.

Vorgang	Veränderte Fläche gegenüber dem leeren Board
Pfeil 1 gewertet	4 710
Pfeil 2 gewertet	8 885
Pfeil 3 gewertet	14 100
Nach dem Ziehen	24
Weitere Ablehnungen danach	33 · 30 · 78 · 45 · 26

Tabelle 74: Erkennung und Wertung - Fehler 1

Jeder Pfeil bringt rund 4 000 bis 5 000 hinzu. Nach dem Ziehen fällt der Wert unter 100. Als Grenze gilt, dass eine Wertung verworfen wird, wenn die Fläche unter 60 Prozent des Werts der letzten angenommenen Wertung liegt.
Der vierte Anlauf schloss einen Grenzfall, der im bisherigen Betrieb nie eingetreten war: Nach einer vollen Aufnahme steht der Vergleichswert bei rund 14 000. Werden alle Pfeile gezogen und sofort wieder geworfen, bevor das Entfernen erkannt ist, bringt der erste neue Pfeil nur rund 5 000 mit. Weniger als 60 Prozent und wäre fälschlich verworfen worden. Bei zügigem Spiel, etwa während einer Vorführung, ist das möglich. Seither wird der Vergleichswert freigegeben, sobald die Flächenmessung das Board als leer meldet.

Zweiter Fehler: Drei Kameras werteten schlechter als zwei

Der Einzelbefund, der am meisten über den Aufbau aussagt. Zur Prüfung wurde derselbe Pfeil wiederholt in dasselbe Einstichloch gesetzt, in drei Feldern und zwei Reihen zu je fünf Durchgängen, insgesamt 29 Wertungen.

Beteiligte Kameras	Richtig gewertet
zwei	22 von 22
drei	1 von 7

Tabelle 75: Erkennung und Wertung - Fehler 2

Der eine richtige Dreikamerafall war ein Zufallstreffer: Alle drei Einzelschätzungen lagen falsch, das Ergebnis traf das Feld trotzdem. Faktisch waren alle sieben Dreikameramessungen verfälscht.
Das Fehlerbild lässt sich an einem einzelnen Wurf zeigen. Der Pfeil steckte im Doppelring, also bei einem Abstand von rund 0,95.

Kamera	Geschätzter Abstand	Geschätzter Winkel	Zuversicht
2	0,9398	173,1 Grad	0,809
3	0,9503	184,5 Grad	0,796
1	0,0134	99,7 Grad	0,821

Tabelle 76: Erkennung und Wertung - Fehler 2

Kamera 1 setzte den Pfeil in die Mitte der Scheibe und hatte dabei die höchste Zuversicht der drei. Gewertet wurde D19 statt D3, ein Nachbarsegment, 18 Grad daneben.
Die Ursache ist die in der Recherche benannte Eigenschaft: Eine Kamera bestimmt eine Gerade. Zeigt der Pfeil annähernd auf sie zu, erscheint er verkürzt, die Achsenrichtung ist nicht mehr bestimmbar und die Schätzung rutscht entlang der Geraden bis in die Mitte. Der flache Blickwinkel des Aufbaus verstärkt das erheblich: Bei einem Höhenwinkel von rund 15 Grad wird eine Verwechslung von 2 cm entlang des Pfeils zu rund 7,5 cm Versatz auf der Scheibe.
Der Weg zur Ursache führte über fünf Erklärungen, die alle messtechnisch ausgeschlossen wurden.

Vermutete Ursache	Wodurch sie ausgeschlossen wurde
Die Kalibrierung oder die Feldumrisse sind ungenau	Fünf Messungen im selben Loch streuten über 1,3 mm — die Geometrie ist genau
Der Abstand ist auf den falschen Bezug normiert	Die Ringradien sind je Kamera in sich stimmig; Verhältnis Dreifach zu Doppel 0,631 gegen 0,629 nach Norm
Eine Kamera liefert ein schlechtes Bild	Kamera 3 liefert das schärfste Bild und ist an richtigen Wertungen beteiligt
Die Objektivverzeichnung ist nicht korrigiert	Die Linsenkorrektur ist aktiv, der Reprojektionsfehler liegt bei 0,64 bis 0,80 Bildpunkten
Die Zuversicht taugt als Ausschlusskriterium	Der Ausreisser hatte die höchste Zuversicht der drei

Tabelle 77: Erkennung und Wertung - Fehler 2

Hinzu kam ein zweiter Befund: In zwei Fehlfällen lieferte eine Kamera überhaupt keine bestimmbare Achse und ging trotzdem mit Gewicht in die Rechnung ein. Eine Eingangsprüfung fehlte.
Die aufschlussreichste Frage ist, warum der Widerspruch so lange unbemerkt blieb. Bei zwei Kameras ist der mittlere Abstand aus Schritt 5 mathematisch zwingend null: Zwei Geraden schneiden sich immer exakt. Es gibt also keine Kontrolle. Ist eine der beiden Geraden falsch, liefert das System trotzdem einen exakten Schnittpunkt. Nur eben den falschen, ohne jeden Hinweis. Erst ab drei Beiträgen entsteht Redundanz und damit ein messbarer Widerspruch. In allen sieben Dreikamerafällen schlug er aus, wurde aber nicht ausgewertet.
Die Behebung besteht aus einer Eingangsprüfung vor der Zusammenführung. Ist die Kontur einer Kamera im Bild zu kurz, ist ihre Achsenrichtung nicht bestimmbar und ihre Schätzung geht gar nicht erst ein. Das messbare Merkmal ist die Konturlänge: brauchbare Schätzungen lagen bei 84 bis 176 Bildpunkten, die Ausreisser bei 14 bis 37.

Massnahme	Wert	Wirkung
Eingangsprüfung über die Konturlänge	30 Bildpunkte	Kameras ohne bestimmbare Achse gehen nicht in den Schnitt ein
Ausschluss entarteter Paare	Schnittwinkel unter 3 Grad	Nahezu parallele Sichtlinien ergeben keinen belastbaren Schnitt; gemessener Extremfall 0,63 Grad
Niemals ein Wurf verloren	—	Fallen alle bis auf eine Kamera weg, wird nach der bisherigen Logik verfahren

Tabelle 78: Erkennung und Wertung - Fehler 2



Abbildung 48: Arbeitsplatz

Dritter Fehler: drei Fehler rund um den Überwurf

Der Überwurf: eine Aufnahme, die den Punktestand unter null drücken würde, hat drei verschiedene Fehler sichtbar gemacht. Sie hängen zusammen, weil der Überwurf der einzige Vorgang ist, der eine Aufnahme vorzeitig beendet und gleichzeitig einen Lichteffekt auslöst.

Teil	Inhalt
Befund 1	Nach einem Spielerwechsel erschien ohne einen einzigen geworfenen Pfeil die Wertung T19 und löste einen Überwurf aus
Ursache	Unmittelbar nach dem Ziehen ist die Hand noch im Bild. Die Erkennung wertete bereits wieder
Behebung	Beruhigungszeit von 1 500 ms nach dem Ende der Entfernungsphase, in der nicht gewertet wird
Befund 2	Nach einem Überwurf steckten drei Pfeile sichtbar im Board, die veränderte Fläche betrug 31, 24 und 11 Bildpunkte und kein weiterer Pfeil wurde mehr angenommen
Ursache	Der Lichteffekt des Überwurfs löste eine Neuaufnahme des Hintergrunds aus. Die Schutzbedingung prüfte den Namen des Zustands statt des tatsächlichen Inhaltes des Boards
Behebung	Die Neuaufnahme richtet sich nach dem gemessenen Boardinhalt, nicht nach dem Zustandsnamen
Befund 3	Ein Überwurf nach dem ersten oder zweiten Pfeil beendete die Aufnahme nicht. Das System wartete auf einen weiteren Pfeil, obwohl die Aufnahme vorbei war
Ursache	Die Aufnahme galt erst nach drei Pfeilen als beendet
Behebung	Überwurf und Sieg beenden die Aufnahme unabhängig von der Zahl der geworfenen Pfeile

Tabelle 79: Erkennung und Wertung - Fehler 3

Der zweite dieser Fehler ist der lehrreichste. Die Schutzbedingung war inhaltlich richtig gedacht. Der Hintergrund darf nur neu aufgenommen werden, wenn das Board leer ist. Wurde aber falsch geprüft: über den Namen eines Zustands statt über eine Messung. Nach einem Überwurf heisst der Zustand so, als sei das Board leer. Es steckten aber drei Pfeile darin. Seither wird gemessen, nicht nachgeschlagen.

8.8.5 Ergebnis und bekannte Grenzen

Der Nachweis über die Wertung ist in P-06 geführt, über zwei Wurfreihen zu je hundert Würfen.

Grösse	Wurfreihe 1	Wurfreihe 2	Beide
Würfe gesamt	100	100	200
Davon richtig gewertet	92	88	180
Davon falsch gewertet	5	8	13
Davon nicht erkannt	3	4	7
Fehlerereignisse	8	12	20
Davon Grenzfälle	4	4	8
Doppelwertungen	0	0	0

Tabelle 80: Erkennung und Wertung - Ergebnisse

Die Trefferquote beträgt damit 90 Prozent gegen eine Anforderung von mindestens 80 Prozent. Die Null bei den Doppelwertungen über 200 Würfe ist der Nachweis, dass der erste Fehler dieser Phase behoben ist.
Nach Ringen aufgeschlüsselt zeigt sich, wo die Erkennung stark und wo sie schwach ist.

Ring	Treffer	Davon richtig	Quote
Single	142	131	92.25 Prozent
Doppelring	23	15	65,2 Prozent
Dreifachring	22	21	95,5 Prozent
Bull und Bullseye	13	13	100 Prozent
Gesamt	200	180	90 Prozent

Tabelle 81: Erkennung und Wertung - Ergebnisse

Die Zeit vom Einstich bis zur Anzeige ist in P-05 über zehn Durchgänge gemessen worden: 1,0 bis 3,5 Sekunden, im Mittel 1,85 Sekunden, gegen einen Sollwert von höchstens 5 Sekunden.
Die Regeln der Wertung und der Spiellogik sind zusätzlich durch 487 Prüffälle in 28 Testdateien abgesichert, die bei jeder Änderung am Quelltext erneut laufen. Sie weisen nicht das Ergebnis eines einzelnen Tages aus, sondern dass keine Änderung eine dieser Regeln stillschweigend verletzen konnte.
Vier Grenzen sind bekannt und benannt.

Grenze	Was sie bedeutet
Der Doppelring ist der schwächste Bereich mit 65,2 Prozent	Er ist mit 8 mm der schmalste Ring am äussersten Rand, wo der Blickwinkel am flachsten ist und ein kleiner Fehler in der Sichtlinie am stärksten wirkt
Die Eingangsprüfung fasst nicht jeden Ausreisser	Die Schwelle liegt bei 30 Bildpunkten, gemessene Ausreisser reichten bis 37
Bei zwei Kameras gibt es keine Selbstkontrolle	Zwei Geraden schneiden sich immer exakt; ein Fehler in einer der beiden bleibt ohne Hinweis
Fremdlicht verändert das Hintergrundbild	Der LED-Ring überstrahlt wechselndes Umgebungslicht, hebt die Abhängigkeit aber nicht auf

Tabelle 82: Erkennung und Wertung - Grenzen

8.8.6 Abschluss der Phase

Die Phase ist abgeschlossen. Die Kette vom Kamerabild bis zum Punktestand läuft vollständig und ohne Eingriff. Die Wertung erreicht 90 Prozent gegen eine geforderte Quote von 80 Prozent und die drei gefundenen Fehler sind behoben und durch automatisierte Tests gegen ein unbemerktes Wiederauftreten abgesichert. Damit sind A1 bis A4 eingelöst und A22 ist auf der Seite des Betriebs belegt: Die drei Kameras liefern gleichzeitig Bilder in der Auflösung, die K2 verlangt.
Was die Erkennung an Fehlern übriglässt, muss am Gerät zu berichtigen sein. Das ist der Gegenstand der nächsten Phase.

8.9 Phase 5 – Spiellogik und Anzeige

Nach Phase 4 steht eine Punktzahl. Sie steht aber nur im Protokoll der Erkennungseinheit und ein Spiel ist sie noch nicht: Niemand sieht einen Punktestand, niemand kann einen falsch erkannten Wurf berichtigen und nichts entscheidet, wann eine Aufnahme zu Ende ist. Diese Phase macht aus der Punktzahl ein Spiel und bringt es auf den Bildschirm.
Die Phase umfasst zwei Teile auf zwei Rechnern. Auf dem Hauptrechner entsteht die Spiellogik. Punktestand, Überwurf, Sieg, Spielerwechsel, Korrektur. Auf der Anzeigeeinheit entsteht die zweite vollständige Anwendung des Systems: die Bedienoberfläche auf dem Touch-Display.

8.9.1 Recherche

Welches Werkzeug für die Oberfläche

Für die Bedienoberfläche wurden in der Konzeptphase drei Werkzeuge betrachtet. Massgebend waren Vollbildbetrieb, Touch-Bedienung, die Gestaltung der Oberfläche und die verfügbaren Lernunterlagen.

Werkzeug	Eigenschaften
PyQt6	Ausgereifte Bedienelemente; Vollbild und Touch; Schriftmasse lassen sich abfragen
Kivy	Grafikbeschleunigte Oberfläche; auf Mehrfingerbedienung ausgelegt
Tkinter	Einfach und bereits enthalten; eingeschränkter bei Gestaltung und Skalierung

Tabelle 83: Spiellogik & Anzeige - Recherche

Resultat: Gewählt wurde PyQt6. Die Bibliothek bietet geeignete Bedienelemente für den Vollbildbetrieb und die Touch-Bedienung und erlaubt eine flexible Gestaltung der Oberfläche. Zusätzlich waren ausreichend Lernvideos und Beispiele verfügbar, was die Einarbeitung erleichterte.

Entwurfsregel

So wie Phase 4 von einer geometrischen Eigenschaft bestimmt wird, wird diese Phase von einer Entwurfsregel bestimmt: Jede Regel steht an genau einer Stelle.
Der Anlass ist eine Anforderung. A12 verlangt, dass eine Korrektur regelkonform wirkt. Ein durch sie entstehender oder entfallender Überwurf oder Sieg muss automatisch richtig behandelt werden. Die naheliegende Umsetzung wäre, die Folgen einzeln nachzuziehen: Punkte anpassen, prüfen, ob dadurch ein Überwurf entsteht, prüfen, ob ein Sieg entfällt, den Spielerwechsel rückgängig machen, den Zähler richtigstellen. Jede dieser Prüfungen wäre eine zweite Stelle, an der die Spielregeln stehen und damit eine Stelle, die von der ersten abweichen kann. Diese Phase geht deshalb durchgehend einen anderen Weg: Statt einen Fall gesondert zu behandeln, wird er über denselben Weg geführt wie der Normalfall. Das kehrt an vier Stellen wieder. Bei der Korrektur, beim Abschluss einer Aufnahme, beim Spielstart und beim Spielzustand der Anzeige. Und es ist auch der Grund für zwei der drei Fehler in dieser Phase.

8.9.2 Geplanter Aufbau — die Funktionsblöcke

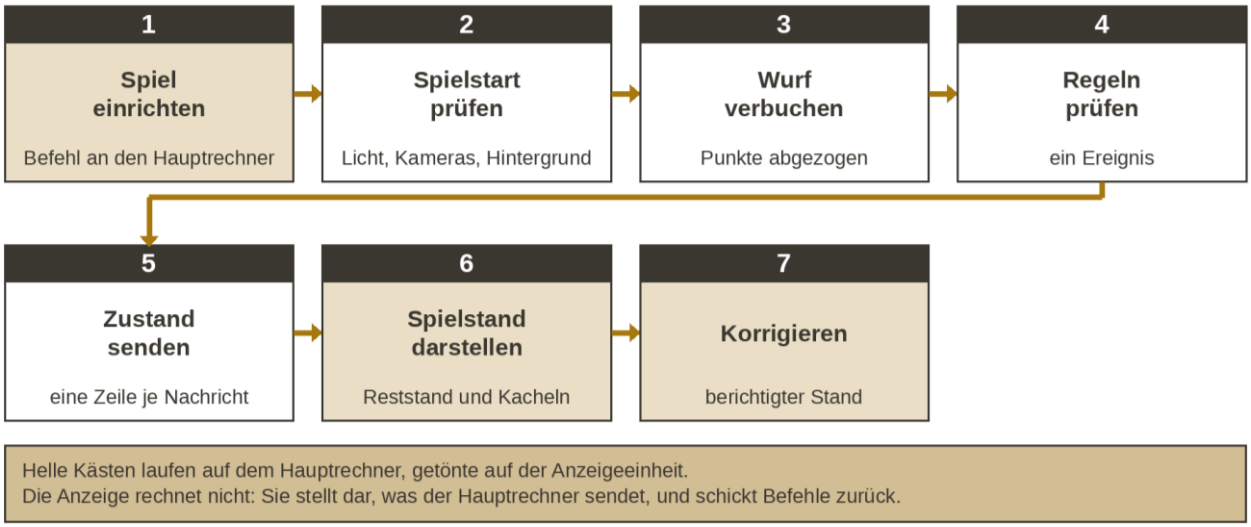


Abbildung 49: Die sieben Funktionsblöcke der Spiellogik und der Anzeige

Block	Aufgabe	Ergebnis
1	Spielart, Spielerzahl und Abschlussregel am Display wählen	Befehl an den Hauptrechner
2	Den Spielstart als geprüften Ablauf durchlaufen	Licht, Kameras und Hintergrundbild stehen
3	Die Punkte eines gewerteten Wurfs vom Reststand abziehen	neuer Reststand
4	Prüfen, was der Wurf für das Spiel bedeutet	ein Ereignis: angenommen, Überwurf, Sieg, Spielerwechsel
5	Den vollständigen Spielzustand an die Anzeige senden	eine Zeile je Nachricht
6	Reststand, Wurfkacheln und Ausschecktipp darstellen	die Spielansicht
7	Einen Wurf am Gerät berichtigen	berichtigter Spielstand

Tabelle 84: Spiellogik & Anzeige - Funktionsblöcke

Die Blöcke 1, 6 und 7 laufen auf der Anzeigeeinheit, die übrigen auf dem Hauptrechner. Diese Aufteilung bestimmt auch die Arbeitsweise. Die Blöcke des Hauptrechners wurden einzeln und in dieser Reihenfolge als abgegrenzter Auftrag an Claude Code übergeben, jeweils direkt in der Entwicklungsumgebung. Die Anwendung der Anzeigeeinheit entstand nicht in einem Zug, sondern wuchs am Gerät: Aufbau, Gestaltung und Bedienablauf wurden selbst entworfen.

8.9.3 Aufbau des Anzeigeprogramms

Die Anzeige ist die zweite vollständige Anwendung des Systems. Sie liegt in einem eigenen Archiv, wird getrennt aufgespielt und läuft auf dem Anzeigerechner.
Die Anzeige rechnet nichts. Punktestand, Überwurf, Sieg und Ausschecktipp kommen fertig vom Hauptrechner. Die Anwendung stellt dar und nimmt Bedienhandlungen entgegen. Damit ist ausgeschlossen, dass die beiden Rechner verschiedene Punktestände führen.
Das Hauptprogramm (main.py) ist kurz und enthält keine Spiel-, Anzeige- oder Netzwerklogik. Es liest die Startargumente, bereitet das Oberflächenwerkzeug vor, erzeugt die Teile und verbindet sie miteinander: Die Verbindung meldet einen empfangenen Zustand an die Zustandsquelle, diese meldet die Änderung an das Hauptfenster und das Hauptfenster gibt Bedienbefehle über einen Kommandokanal zurück an die Verbindung.

Die Teile des Programms

Teil	Was darin liegt
Hauptprogramm	Startargumente, Vorbereitung des Oberflächenwerkzeugs, Erzeugen und Verbinden der Teile
Oberfläche	Hauptfenster als einzige Stelle, die alle Teile kennt. Die drei Menüseiten, die Spielansicht, das Korrekturfeld, die Banner, die Schaltflächen für Ausschalten und Neustart. Dazu die Gestaltung mit Farben, Schriften und Formatvorlage und die Ermittlung der Schriftgrössen aus den Schriftmassen
Verbindung	Netzwerkverbindung zum Hauptrechner in einem eigenen Programmfaden, das zeilenweise Zerlegen der empfangenen Daten, die Kommandonamen und der Spielzustand als unveränderliche Datenklasse
Werkzeuge	Ersatz für die Brücke des Hauptrechners. Sie spricht dasselbe Protokoll und macht die Anzeige ohne Gegenstelle bedienbar
Prüffälle	automatisierte Prüfungen, die ohne Kamera und ohne Hauptrechner laufen

Das Warten auf das Netzwerk läuft getrennt von der Anzeige. Die Verbindung zum Hauptrechner arbeitet für sich allein. Die Oberfläche wartet nie auf eine Antwort, sondern wird benachrichtigt, sobald etwas angekommen ist. Ohne diese Trennung würde das Bild bei jedem Verbindungsversuch stehen bleiben.
Jede Nachricht bringt den ganzen Spielstand, nicht nur die Änderung.

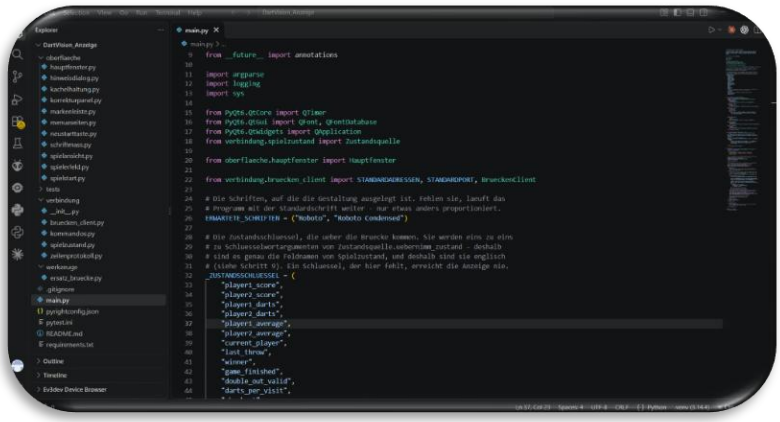


Abbildung 50: VS-Programm

8.9.4 Die einzelnen Schritte

Schritt 1 — Das Spiel einrichten

A6 verlangt, dass Spielart und Spielerzahl am Display gewählt werden können. Der Weg dorthin ist bewusst in drei Seiten aufgeteilt statt in eine Einstellungsmaske: Startseite, dann Spielerzahl, dann Spielart mit Abschlussregel. Jede Seite trägt genau eine Entscheidung.
Die Seiten kennen einander nicht. Sie melden den gewählten Wert als Ereignis. die Navigation und das Absenden des Befehls liegen an einer Stelle im Hauptfenster.



Abbildung 51: Startseite



Abbildung 52: Wahl der Spielerzahl



Abbildung 53: Die Spielart

Schritt 2 — Der Spielstart als geprüfter Ablauf

Ein Spiel beginnt nicht damit, dass der Punktestand gesetzt wird. Zwischen dem Befehl «neues Spiel» und dem ersten gewerteten Dart liegt ein Ablauf mit vier Betriebszuständen.

Zustand	Was geschieht	Weshalb
Ruhezustand	Erkennung aus, Licht gedimmt	Gegenstand der Phase 6
Vorbereitung	LED auf Vollweiss, 3 000 ms Beruhigung, dann Kameraprüfung und Hintergrundbild	Leuchtdioden ändern ihre Helligkeit beim Aufwärmen
Rückfrage	die Kameraprüfung ist auffällig, das System wartet auf eine Entscheidung	A5
Spielbetrieb	Erkennung ein, das Spiel läuft	Sollzustand

Tabelle 85: Spiellogik & Anzeige - Spielstart

Die Kameraprüfung sitzt bewusst hier und nicht früher. Sie vergleicht Livebilder mit den Referenzbildern aus Phase 3, die unter Vollweiss aufgenommen wurden. Sie prüft somit genau die Bedingungen, unter denen anschliessend gespielt wird. Ein Prüfschritt vor dem Aufhellen würde einen Zustand messen, den es im Spiel nicht gibt.
Bei einer Auffälligkeit wird gewarnt, nicht blockiert. Das ist ein Entscheid gegen die strengere Lösung: Eine Kameravertauschung erzeugt gespiegelte Punktzahlen ohne Fehlermeldung und muss deshalb auffallen. Der häufigste Grund für einen niedrigen Prüfwert ist aber veränderte Beleuchtung und nicht eine Vertauschung. Angezeigt werden die Messwerte selbst, nicht nur ein Warnzeichen und das Fortsetzen verlangt eine ausdrückliche Bestätigung.



Abbildung 54: Systemvorbereitung

Auch ein neues Spiel nach einem Sieg geht über genau diesen Ablauf und nicht über einen abgekürzten Weg. Der Grund ist ein Befund aus der Umsetzung: Ein neues Spiel setzte zuerst nur den Spielstand zurück, nicht den Erkennungsautomaten. Stecken beim Neustart noch Pfeile im Board, laufen beide auseinander. Das Spiel steht bei 301, die Erkennung hält die steckenden Pfeile für bereits gewertet und wartet auf ihr Entfernen. Über den vollständigen Ablauf wird ein frisches Hintergrundbild aufgenommen und damit sind steckende Pfeile Teil des Hintergrunds.

Schritt 3 — Einen Wurf verbuchen

Die Spiellogik kennt keine Bilder. Sie nimmt einen gewerteten Wurf entgegen, zieht seine Punkte vom Reststand ab, zählt den Wurf in der laufenden Aufnahme mit und gibt ein Ereignis zurück.
Dass jede Operation ein Ereignis zurückgibt, statt nur den Spielzustand zu ändern, ist die Stelle, an der die Anzeige und später die Lichtsteuerung andocken. Beide reagieren auf das Ereignis und nicht auf einen Vergleich zweier Zustände.

Schritt 4 — Die Regeln prüfen

Nach dem Abziehen fragt die Logik in dieser Reihenfolge: Ist es ein Sieg? Ist es ein Überwurf? Ist die Aufnahme voll? Die Reihenfolge trägt eine Regel, die man leicht übersieht: Ein Reststand von 0 ist unter Double-Out entweder ein Sieg oder ein Überwurf. Nie beides und nie keines von beiden.
Die Überwurfbedingung ist die Stelle, an der sich das Regelwerk am kürzesten zeigt.

```
def _is_bust(self, score: int, throw: DartThrow) -> bool:
    if score < 0:
        return True
    if not self._double_out:
        return False
    if score == 1:
        return True
    if score == 0 and not throw.is_double_out:
        return True
    return False
```

Die erste Zeile ist die Regel, die jeder kennt: Unter null ist ein Überwurf. Die dritte sagt, dass ohne Double-Out alles Weitere entfällt. Die vierte Regel: Ein Reststand von genau 1 ist ein Überwurf, obwohl er positiv ist. Aus 1 lässt sich kein Doppel mehr werfen. Und die fünfte behandelt den Fall, dass die Null zwar erreicht, aber nicht mit einem Doppel abgeschlossen wurde.
Beim Überwurf wird der Reststand auf den Wert vor Beginn der Aufnahme zurückgesetzt, nicht auf den Wert vor dem letzten Wurf. Die Punkte der ganzen Aufnahme verfallen. Das ist die Regel des Spiels und der Grund, weshalb der Anfangswert jeder Aufnahme mitgeführt wird.
Der Ausschecktipp wird bei jeder Zustandsänderung neu bestimmt: Zu Reststand und Zahl der verbleibenden Pfeile sucht die Logik den kürzesten gültigen Abschluss. Unter Double-Out muss dessen letzter Pfeil ein Doppel oder das Bullseye sein. Der Tipp folgt also derselben Regel, gegen die anschliessend geprüft wird. Ein Tipp mit einem anderen Regelsatz würde Abschlüsse vorschlagen, die dann als Überwurf gewertet werden.

Schritt 5 — Den Zustand übertragen

Der Hauptrechner veröffentlicht nach jeder Änderung den vollständigen Spielzustand: beide Punktestände, die Wurfkacheln beider Spieler, Durchschnitt, Spieler am Zug, Ausschecktipp, Sieger, Überwurf, Spielart und Abschlussregel. Übertragen wird je Nachricht eine Zeile.
Die Anzeige führt keinen eigenen Spielzustand. Spielart, Spielerzahl und Abschlussregel liest sie aus dem übertragenen Zustand, obwohl sie in ihrem eigenen Menü eingestellt wurden. Der Grund ist wieder die Entwurfsregel: Ein gemerkter und ein empfangener Wert können auseinanderlaufen, ein nur empfangener kann es nicht.
Das Funknetz selbst, über das diese Zeilen laufen, gehört zu Phase 6.

Schritt 6 — Den Spielstand darstellen

Die Spielansicht zeigt beide Spieler nebeneinander: Name, Reststand, Ausschecktipp und Durchschnitt, dazu je drei Wurfkacheln für die angezeigte Aufnahme. Über allem liegt oben rechts die Verbindungsanzeige als einzelner farbiger Punkt. Sie ist bewusst klein gehalten. Die Punktzahlen bleiben das Hauptelement.



Abbildung 55: Spielansicht - laufendes Spiel

Zwei Ereignisse legen sich über diese Ansicht. Ein Überwurf blendet ein Banner ein, das nach kurzer Zeit wieder verschwindet; ein Sieg blendet ein Banner ein, das stehenbleibt und darunter einen Streifen mit «Nochmal» und «Hauptmenü». Der Unterschied ist Absicht: Das eine meldet ein Ereignis, das andere einen Zustand.

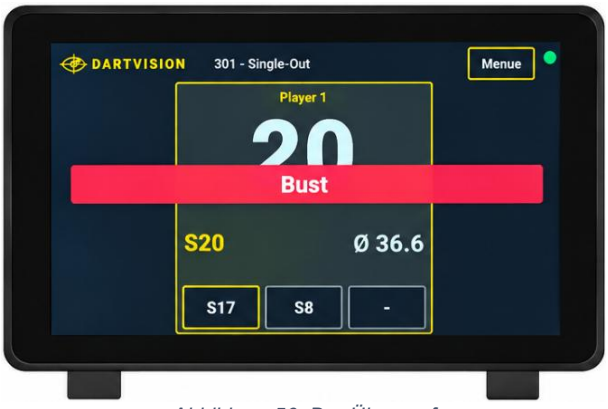


Abbildung 56: Der Überwurf



Abbildung 57: Das Spielende

Wo eine Handlung nicht umkehrbar ist, fragt die Anzeige zurück. Das betrifft das Verlassen eines laufenden Spiels ins Hauptmenü.



Abbildung 58: Die Rückfrage

Zwei Masse bestimmen die Gestaltung dieser Ansicht und beide sind in Millimetern festgelegt und nicht in Bildpunkten. Das Panel misst 1280 × 720 Bildpunkte auf 155 × 88 mm aktiver Fläche, also 8,18 Bildpunkte je Millimeter senkrecht. Damit lässt sich jede Vorgabe in Millimetern am Aufbau mit einem Lineal nachprüfen.
Das erste Mass betrifft die Schrift. Eine Schriftgrösse sagt nicht, wie hoch ihre Grossbuchstaben werden: Das Verhältnis ist von Schriftfamilie zu Schriftfamilie verschieden und die gewünschte Familie kann auf dem Gerät fehlen und stillschweigend ersetzt werden. Eine Vorgabe «Schriftgrad 200» ist deshalb nicht prüfbar. Festgelegt ist stattdessen die Versalhöhe und die Schriftgrösse wird dazu gesucht. An derselben Schrift, die anschliessend auch gezeichnet wird.

```
def box_for_cap_height(
    families: tuple[str, ...], cap_height: float, bold: bool = True
) -> TextBox:
    size = max(1, round(cap_height))
    box = measure(families, size, bold)
    for _ in range(12):
        if box.cap_height <= 0:
            return box
        if abs(box.cap_height - cap_height) < 0.5:
            break
        scaled = max(1, round(size * cap_height / box.cap_height))
        if scaled == size:
            break
        size = scaled
        box = measure(families, size, bold)
    return box
```

Das Programm misst die Versalhöhe bei einer ersten Schätzung, rechnet daraus die nächste Schätzung aus und wiederholt das, bis die Abweichung unter einem halben Bildpunkt liegt — höchstens zwölfmal. Es bricht auch ab, wenn die nächste Schätzung dieselbe wäre wie die letzte und es gibt auf, wenn das Gerät überhaupt keine Schriftmasse meldet. Wird die Wunschschrift auf dem Gerät ersetzt, trifft die Anzeige dieselbe Höhe. Sie trifft dann nur einen anderen Schriftgrad.
Das zweite Mass betrifft die Berührflächen: mindestens 10 mm in der kleineren Abmessung für alles, was mit dem Finger bedient wird, auf diesem Panel also rund 80 Bildpunkte.

Schritt 7 — Korrigieren am Gerät

A9, A10 und A11 verlangen vier verschiedene Handlungen: Wert ändern, als Fehlwurf setzen, löschen, nachtragen. Der Dialog bildet sie mit einem einzigen Bedienmuster ab. Ring wählen, dann Segment antippen. Bull, Bullseye, Fehlwurf und Löschen senden unmittelbar.
Der Dialog wertet nichts. Er baut ausschliesslich die Befehlsargumente. Der Punktwert entsteht auf dem Hauptrechner. Damit gibt es die Wertungsregeln auch hier nur an einer Stelle.



Abbildung 59: Das Korrekturfeld

Auf dem Hauptrechner wird die Korrektur in drei Schritten ausgeführt: zurückspulen auf den Zustand vor Beginn der angezeigten Aufnahme, die Wurfliste mit dem berichtigten Wert neu zusammenstellen, die Aufnahme noch einmal durchspielen. Wurf für Wurf, über genau denselben Weg wie ein geworfener Pfeil.

```
self._history.append(self._capture())
self._restore_core(baseline)
self._visit_baseline = baseline
event = GameEvent.THROW_ACCEPTED
for dart in new_darts:
    event = self._apply_dart(dart)
```

Die beiden letzten Zeilen tragen die ganze Anforderung. `_apply_dart` ist dieselbe Stelle, die auch einen geworfenen Pfeil verbucht und damit laufen Überwurf, Sieg und Spielerwechsel bei einer Korrektur nicht durch eine Sonderbehandlung, sondern weil dieselben Prüfungen noch einmal durchlaufen werden.

Die Korrektur: zurückspulen und nachspielen

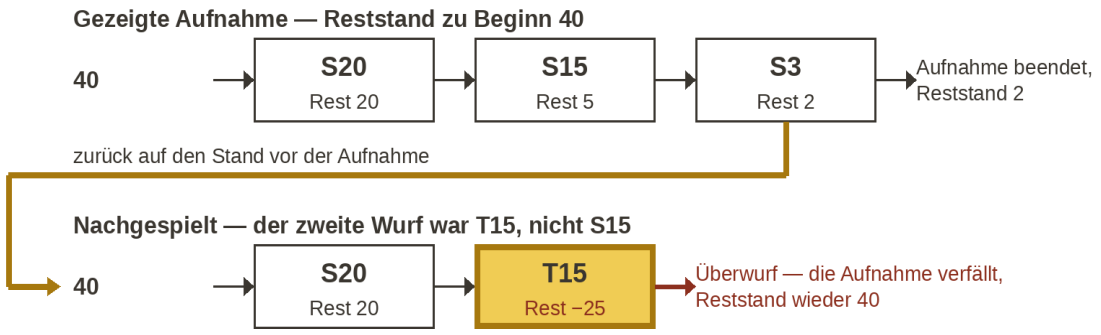


Abbildung 60: Die Korrektur am Beispiel

Drei Eigenschaften ergeben sich daraus von selbst.

Eigenschaft	Weshalb
Ändern, löschen und nachtragen sind derselbe Vorgang	Die Wurfliste wird ersetzt. Ob sie dabei kürzer, gleich lang oder länger wird, spielt keine Rolle. A10 braucht keinen eigenen Weg
Das Zurücknehmen bleibt eine einzige Handlung	Vor dem Zurückspulen wird der Zustand vor der Korrektur festgehalten. Ein Zurücknehmen macht die ganze Korrektur rückgängig und nicht den zuletzt nachgespielten Wurf
Eine unzulässige Korrektur ändert nichts	Eine ungültige Wurfnummer führt zum Ereignis «nicht zulässig», bevor zurückgespult wird

Tabelle 86: Spiellogik & Anzeige - Korrektur

Welche Aufnahme korrigiert wird, folgt dem, was der Spieler sieht und nicht dem, was intern gerade läuft: die laufende Aufnahme, wenn sie Würfe enthält, sonst die zuletzt abgeschlossene. Damit ist A11 erfüllt, die Korrigierbarkeit nach einem Spielerwechsel.
Ein Nebenweg musste dabei nachgezogen werden. Nach einer Korrektur kann die Aufnahme eine andere Zahl von Würfen haben als vorher und der Erkennungsautomat führt seinen eigenen Rundenzähler. Die Spiellogik meldet deshalb nach jeder Korrektur die neue Zahl zurück. Es ist die einzige Rückmeldung vom Spielzustand in den Erkennungsautomaten.

8.9.5 Was dabei schiefging

Die drei Fehler dieser Phase haben eines gemeinsam: Alle drei steckten in einer Bedingung, einer Bauform oder einer Zuständigkeit. An Stellen also, an denen die Entwurfsregel dieser Phase nicht eingehalten war.

Erster Fehler: Die Siegbedingung war nur in einem Spielmodus erfüllbar

Nach einem gewonnenen Spiel erschien weder das Siegbanner noch der Streifen mit den Schaltflächen. Der LED-Ring schaltete dabei korrekt auf Grün. Die Spiellogik kannte den Sieg also.
Der Befund wirkte wie ein Rückschritt, weil beides in einem früheren Auftrag umgesetzt und dort als geprüft galt. Die Untersuchung zeigte: Auf der Anzeigeseite hatte sich an diesem Pfad nichts geändert. Die Ursache war die Siegbedingung der Anzeige selbst. Sie verlangte drei Merkmale gleichzeitig. Spiel beendet, Sieger bekannt und gültiger Doppel-Abschluss. Das letzte Merkmal ist in einem Single-Out-Spiel zwangsläufig falsch: Dort gibt es keinen Doppel-Abschluss.
Die Bedingung war also Modus abhängig und in Single-Out unerfüllbar. In Double-Out griff sie, womit sich erklärt, weshalb sie bei der Abnahme als geprüft galt: Geprüft wurde im Modus, in dem sie funktionierte.

Zweiter Fehler: Der Dialog öffnete sich unter dem liegenden Finger

Beim Korrigieren wurde nach dem Antippen eines Einzelfelds teilweise ein anderer Wert eingetragen. Angetippt 12, angezeigt 1 oder 3, manchmal richtig.
Zwei Feststellungen grenzten den Suchraum ein. Der Hauptrechner ist unschuldig: Die Protokollzeile zeigt das Segment, das die Anzeige gesendet hat. Sie sendet also den Wert der Schaltfläche, die sie für getroffen hält. Und der Quelltext ist richtig: Beschriftung und Wert sind fest aneinandergebunden, keine der 22 Trefferflächen überlappt eine andere und in der Mitte jeder Fläche liefert das Rahmenwerk die erwartete Schaltfläche. Es war also ein räumlicher Versatz und kein Zuordnungsfehler.
Danach drei Vermutungen, jede durch eine Messung erledigt.

Vermutung	Widerlegt durch
Der Dialog sei durch die Gestaltungsänderung gewachsen	Der Quelltext ist vor und nach der Änderung byteweise gleich, die Schriftgrössen im Stilblatt unverändert
Die Fensterpositionierung komme verzögert	Warten hilft nicht. Zwei und fünf Sekunden zwischen Öffnen und Antippen ändern nichts. Käme die Korrektur verzögert, würde Warten sie einholen
Das Innenleben sei beim Anzeigen noch nicht ausgerichtet	Null von 28 Schaltflächen ändern ihre Geometrie durch den auslösenden Druck

Tabelle 87: Spiellogik & Anzeige - Fehler 2

Der entscheidende Befund kam aus einer Beobachtung am Gerät: Ein vorheriger Druck auf irgendeine Ring-Schaltfläche machte alle folgenden drücke richtig. Auch ein Druck auf «Single», das ohnehin ausgewählt ist. Es zählte der Vorgang, nicht die Wirkung.
Die Ursache: Der Dialog wurde aus dem Druckereignis der Wurfkachel heraus geöffnet, bevor der Finger gehoben war. Das zugehörige Loslassen traf nicht mehr die Kachel, sondern dass gerade erschienene Feld. Der erste vollständige Druck-und-Loslassen-Vorgang im neuen Feld löste den Zustand auf.
Die Beobachtung «Doppel und Dreifach funktionieren immer» war nie ein Widerspruch, sondern der entscheidende Hinweis. Nur falsch gelesen. Dort ist der Druck auf die Ringzeile der erste und ein Versatz fällt in einer 306 Bildpunkte breiten Fläche ganz oben nicht auf.
Auch eine Verfeinerung wurde geprüft und verworfen, und zwar rechnerisch: Hätte die Kachel den Zeiger an sich gebunden und das nächste Ereignis über ihr Koordinatensystem umgerechnet, ergäbe das 561 Bildpunkte Versatz gegenüber beobachteten 82 bis 164. Ein Vielfaches zu gross.
Behoben wurde der Fehler durch zwei Änderungen an der Bauform und nicht durch eine Ausgleichsrechnung. Der Dialog ist kein eigenes Fenster mehr, sondern Bestandteil des Hauptfensters. Wie das Überwurf-Banner und der Siegstreifen, die den Fehler nie zeigten. Und er wird nicht mehr aus dem Druckereignis heraus geöffnet, sondern nachdem dieses zurückgekehrt ist.

Dritter Fehler: Vier Mechanismen hielten dieselbe Information zurück

Nach einem Spielerwechsel zeigten die Wurfkacheln des eintretenden Spielers noch seine eigene vorherige Aufnahme. Sie ist abgeschlossen und nicht mehr korrigierbar. Und sie stand der Korrektur des tatsächlich zuletzt geworfenen Pfeils im Weg. Die Regel dagegen ist einfach: Beim Wechsel werden die Kacheln des eintretenden Spielers geleert, aber nur, wenn er nicht derselbe ist, der gerade geworfen hat.
Daraus entstand eine Lücke im Einzelspielerbetrieb. Wird der erste Pfeil einer neuen Aufnahme nicht erkannt, lässt er sich nicht eintragen: Die Kacheln gehören noch zur alten Aufnahme. Erst ein erkannter Pfeil wechselt die Anzeige. Und genau der fehlt ja. Gelöst wurde das mit einer Schaltfläche «Weiter», die dieselbe Wirkung hat wie der erste erkannte Pfeil.
Nach der ersten Umsetzung traten zwei Fehler auf, beide mit derselben Wurzel.

Teil	Inhalt
Befund 1	«Weiter» erschien nur nach der ersten Aufnahme
Ursache	Die Sichtbarkeit hing an einem Merker, der nur gesetzt wurde, wenn der Hauptrechner von belegt auf leer wechselte. Sendet er stattdessen direkt den nächsten Wert, wird der Merker nie gesetzt

Teil	Inhalt
Befund 2	Nach einem neuen Spiel zeigten die Kacheln die Würfe des vorherigen
Ursache	Beim Zurücksetzen wurde nicht gemerkt, welche Werte gerade anlagen. Der Hauptrechner veröffentlicht das beendete Spiel weiter, bis er das neue vorbereitet hat. Die nächste Nachricht sah wie frisch geworfene Pfeile aus

Tabelle 88: Spiellogik & Anzeige - Fehler 3

Die tiefere Ursache war die Schichtung. Vier Mechanismen hielten dieselbe Information zurück: die Haltefunktion auf dem Hauptrechner, die Haltefunktion in der Anzeige, die Unterdrückung beim Spielerwechsel und «Weiter». Jeder für sich war richtig aber sie griffen ineinander und schon beim Bauen war aufgefallen, dass die Unterdrückung vor der Haltefunktion greifen muss.
Zusammengeführt wurden sie zu einer Regel mit drei ausdrücklichen Auslösern: Die Kacheln folgen dem Hauptrechner nur, wenn sich sein Wert ändert und dabei nicht leer ist. Geleert wird ausschliesslich durch Zugwechsel, «Weiter» oder ein neues Spiel.
Der Kern der Behebung ist dabei nicht die Zusammenführung, sondern ein Wechsel der Herkunft: «Aufnahme beendet» wird seither abgeleitet statt gemerkt. Entweder hat der Hauptrechner geleert, oder die gezeigte Aufnahme ist voll. Ein Merker, der von einer bestimmten Nachrichtenfolge abhängt, geht kaputt, sobald die Gegenseite anders sendet; eine Ableitung aus dem sichtbaren Zustand nicht.

8.9.6 Ergebnis und bekannte Grenzen

Der Nachweis am Gerät ist in P-05 geführt, über einen Spielbetrieb von 75 Minuten.

Grösse	Wert
Nicht erkannte Würfe, über die leere Wurfkachel richtig nachgetragen	10 von 10
Davon mit Spielabbruch	keiner
Korrekturfälle bestanden	9 von 9
Punkte zum Spielablauf bestanden	8 von 8
Höchste gemessene Zeit bis zur Anzeige	3,5 s gegen Sollwert von 5 s
Bedienung ohne Tastatur und Maus	über den ganzen Lauf

Tabelle 89: Spiellogik & Anzeige – Ergebnisse

Die vier gewichtigsten Korrekturfälle: Überwurf erzeugen, Überwurf entfernen, Sieg erzeugen und entfernen, Korrektur nach dem Spielerwechsel sind je zehnmal durchgespielt worden und waren zehn von zehn Mal richtig. Sie sind die Fälle, auf denen A12 ruht.
Die Ablesbarkeit aus der Abwurfdistanz ist in P-06 geprüft: drei Durchgänge aus 2,37 m, Reststand beider Spieler und die drei Wurfkacheln jedes Mal richtig abgelesen.

Zwei Grenzen sind bekannt.

Grenze	Was sie bedeutet
Die Verbindungsanzeige zeigt den Bestand, nicht den Fluss	Der Punkt oben rechts meldet, dass die Verbindung steht, nicht dass Daten ankommen
Die Laufzeit des Akkumoduls	Die Anzeigeeinheit lässt sich abnehmen und näher am Spieler aufstellen. Wie lange der Aku hält ist geprüft. Eine Anzeige des Status auf dem Display fehlt und ist für Prototyp 02 angedacht.

Tabelle 90: Spiellogik & Anzeige - Grenzen

8.9.7 Abschluss der Phase

Die Phase ist abgeschlossen. Ein vollständiges Spiel läuft regelkonform ab, ist am Touch-Display ohne weitere Eingabegeräte bedienbar und jeder Wurf der angezeigten Aufnahme lässt sich korrigieren, ohne dass das Spiel abgebrochen werden müsste. Damit sind A6 bis A14 und A25 eingelöst. Die Übertragung nach A8 wird in Phase 6 gegen Verbindungsabbrüche tragfähig gemacht, die Ablesbarkeit nach A14 in Phase 7 gemessen.
Das System spielt somit. Was noch fehlt, ist alles, was ohne Eingriff geschehen soll. Licht als Rückmeldung, ein eigenes Funknetz, Selbststart und Ruhezustand. Das ist der Gegenstand der nachfolgenden Phase.

8.10 Phase 6 – Ereignisfarben und Betriebsführung

Nach Phase 5 läuft ein vollständiges Spiel. Es läuft allerdings nur, solange ein Laptop in der Nähe ist: Beide Rechner werden von Hand gestartet, beide hängen im Heimnetz und am Board selbst ist nichts zu sehen. Diese Phase behebt beides. Sie gibt den Spielereignissen eine Rückmeldung am Board und sie macht die Anlage eigenständig: eigenes Funknetz, Selbststart beider Rechner, Ruhezustand und Herunterfahren über das Display. Sie ist damit die Phase, nach der die Anlage ohne fremde Infrastruktur und ohne Eingriff spielbereit wird. Wie vom Erfolgskriterium K6 verlangt.
Ein Teil davon ist keine Programmierung, sondern Einrichtung des Betriebssystems. Das unterscheidet diese Phase von den drei vorangegangenen.

8.10.1 Recherche

Welche Rückmeldung das Licht geben darf

Die Anforderungen an die Beleuchtung widersprechen einander auf den ersten Blick.

Anforderung	Inhalt
A15	Im Spielbetrieb leuchtet das Band konstant weiss — es ist die Beleuchtung, unter der die Kameras messen
A16	Definierte Ereignisse lösen Farbwechsel aus; danach kehrt das Band selbstständig zu Weiss zurück
K5	Die definierten Spielereignisse lösen in mindestens 8 von 10 Fällen die richtige Farbe aus

Tabelle 91: Ereignisfarben & Betriebsführung - Recherche

A15 verlangt gleichbleibendes Licht, A16 verlangt wechselndes. Beides zusammen geht nur, wenn der Wechsel dort stattfindet, wo gerade nicht gemessen wird. A16 nennt diese Stelle ausdrücklich: an den Grenzen einer Aufnahme. Rückmeldung gibt es nur dort, wo ohnehin nicht geworfen wird: beim Überwurf, beim Sieg und beim Erreichen der Betriebsbereitschaft.

Welcher Weg die beiden Rechner verbindet

Phase 5 hat gezeigt, was übertragen wird. Womit es übertragen wird, war eine eigene Entscheidung.

Weg	Bewertung
WebSocket	verworfen — Verbindungsaufbau und Rahmung kosten Aufwand ohne Nutzen: Es sind zwei Python-Anwendungen im lokalen Netz beteiligt, kein Browser
Nachrichtenbus oder Rahmenwerk	verworfen — jede zusätzliche Abhängigkeit müsste über die Paketverwaltung beider Geräte verfügbar sein; die systemweite Installation über pip ist auf dem Betriebssystem beider Rechner gesperrt
TCP, ein JSON-Objekt je Zeile	gewählt — beides gehört zur Standardbibliothek, auf keinem der beiden Geräte entsteht eine neue Abhängigkeit

Tabelle 92: Ereignisfarben & Betriebsführung - Verbindung Rechner

Ein dritter Grund kam beim Bauen hinzu und hat sich als der praktisch wichtigste erwiesen. Zeilenweises JSON lässt sich mit Bordmitteln mitlesen. Bei jeder Störungssuche zwischen den beiden Rechnern liess sich der Datenstrom von einem dritten Gerät aus ansehen, ohne eine der beiden Anwendungen anzufassen.

Die Randbedingung

So wie Phase 4 von einer geometrischen Eigenschaft und Phase 5 von einer Entwurfsregel bestimmt wird, wird diese Phase von einer Randbedingung des Aufbaus bestimmt: Der LED-Ring ist zugleich Rückmeldemittel und Messbedingung.
Die Erkennung arbeitet auf dem Unterschied zwischen dem laufenden Bild und einem gespeicherten Hintergrundbild. Dieses Hintergrundbild gilt für die Beleuchtung, unter der es aufgenommen wurde. Jeder Farbwechsel macht es ungültig. Ein rot beleuchtetes Board unterscheidet sich von einem weiss beleuchteten in jedem einzelnen Bildpunkt.
Ein Rückmeldemittel, dass die Messung stört, die es begleitet, ist nicht sinnvoll. Darauf lässt sich jede Entscheidung dieser Phase zurückführen. Sie ist der Grund dafür, dass ein Einzeltreffer unbeantwortet bleibt, dass während und nach jedem Farbwechsel nicht gewertet wird, dass danach ein neues Hintergrundbild fällig ist und dass der Ruhezustand überhaupt ein eigener Betriebszustand ist.

8.10.2 Geplanter Aufbau — die Funktionsblöcke



Abbildung 61: Die sieben Funktionsblöcke der Betriebsführung

Block	Aufgabe	Ergebnis
1	Beide Rechner starten ihre Anwendung ohne Eingriff	beide Anwendungen laufen
2	Der Hauptrechner spannt ein eigenes Funknetz auf	eigener Zugangspunkt
3	Jede Anwendung findet ihre Gegenstelle, ohne den Namen aufzulösen	erste antwortende Adresse
4	Die Anlage steht bedienbar, aber nicht spielbereit	gedimmtes Licht, 5 Bilder je Sekunde
5	Die Spiellogik meldet ein Ereignis, ohne eine Farbe zu kennen	ein benannter Aufruf
6	Die Lichtsteuerung setzt die Farbe und sperrt die Wertung	Sperre bis zu einem Ablaufzeitpunkt
7	Die Anlage lässt sich am Display geordnet abschalten	sauber beendete Anwendungen

Tabelle 93: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funktionsblöcke

Die Übertragung zwischen den beiden Rechnern entstand in Phase 5 und wird hier nur tragfähig gemacht. Sie läuft einmal je Betriebstag. Die Aufteilung der Arbeit folgt dieser Kette. Die Blöcke 1 und 2 sind Einrichtung des Betriebssystems: Dienste, Zugangspunkt, Adressvergabe. Nur Einrichtungsarbeit. An ihnen wurde nicht programmiert. Die Blöcke 3 bis 6 sind Blöcke des Hauptrechners und wurden einzeln an Claude übergeben, jeweils direkt in der Entwicklungsumgebung. Block 7 reicht über beide Geräte.

8.10.3 Die einzelnen Schritte

Schritt 1 — Selbststart

In der ersten Fassung starteten beide Anwendungen über den Autostart-Eintrag der Bedienoberfläche. Der startet ein Programm, überwacht es aber nicht: Stürzt es ab, bleibt es aus.
Beide Anwendungen laufen deshalb als Benutzerdienst — `dartvision` — auf dem Hauptrechner, — `dartvision-display` — auf der Anzeigeeinheit. Ein Hindernis war dabei zu umgehen: Ein Dienst, der ein Fenster öffnet, muss auf die Bildschirmsitzung warten und der dafür vorgesehene Anknüpfungspunkt ist auf diesen Geräten nicht aktiv. An seine Stelle tritt eine Wartebedingung, die bis zu 60 Sekunden auf den Anschluss der Bildschirmsitzung wartet.

Vorgang	Verhalten	Weshalb geprüft
Abschuss des Prozesses	Dienst startet nach vier Sekunden neu	der Absturzfall, für den die Einstellung gedacht ist
geordnetes Anhalten	Dienst bleibt aus, kein Neustart	die wichtigere Prüfung — ohne sie liesse sich die Anlage über das Display nie ausschalten

Tabelle 94: Ereignisfarben & Betriebsführung - Selbststart

Ein Neustartautomatismus, der auch das gewollte Anhalten rückgängig macht, hätte den Ausschaltweg aus Schritt 8 unbrauchbar gemacht. Ergänzt ist eine Einstellung, die den Benutzerdienst unabhängig von einer Anmeldung laufen lässt. Damit fahren beide Geräte nach dem Herstellen der Netzspannung selbstständig hoch, starten ihre Anwendung und verbinden sich. Damit ist A18 auf der Seite der Anwendungen erfüllt; das Netz, in dem sich die Geräte finden, kommt in Schritt 2 dazu.

Schritt 2 — Das eigene Funknetz aufspannen

A17 verlangt ein eigenes WLAN ohne fremde Infrastruktur, A19 einen Wartungszugang darüber, A23 den gleichzeitigen Betrieb mit drei Kameras. Dazu kommt eine Bedingung aus der Entwicklung, die im Pflichtenheft nicht steht: Beim Arbeiten zuhause muss der Fernzugriff über das Heimnetz erhalten bleiben. Ohne ihn ist keine Fehlersuche möglich. Daraus resultiert:
Das interne Funkmodul kann nicht gleichzeitig zwei verschiedene WLAN-Kanäle nutzen. Wenn sich der Raspberry Pi mit einem bestehenden WLAN verbindet, muss sein eigenes WLAN deshalb denselben Kanal verwenden. Damit wäre DartVision wieder vom fremden Router abhängig. Werden trotzdem zwei verschiedene Kanäle eingestellt, wird eine der beiden WLAN-Verbindungen getrennt.
Ohne das zweite Funkmodul wäre die Fehlersuche deutlich schwieriger. Sobald der Raspberry Pi sein eigenes WLAN startet, würde die Verbindung zum Heimnetz abbrechen. Falls das eigene WLAN wegen eines Fehlers nicht startet, wäre der Rechner über Funk gar nicht mehr erreichbar und die Protokolle könnten nicht ausgelesen werden. Mit dem zweiten Modul bleibt die Verbindung zum Heimnetz bestehen, während das eigene WLAN unabhängig davon eingerichtet und geprüft werden kann.

Die Beschränkung gilt je Funkmodul, nicht je Gerät und wird deshalb durch ein zweites, physisch getrenntes Funkmodul aufgehoben. Massgebend für die Auswahl war nicht Baugrösse oder Hersteller, sondern ob der Treiber im Systemkern enthalten ist.

Chipsatz	Zugangspunkt-Betrieb	Bewertung
RTL8188EUS	nein	scheidet aus
MT7601U	nein	scheidet aus
RTL8822BU	ja, Treiber im Systemkern enthalten	gewählt

Tabelle 95: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funknetz

Ein Adapter ohne Treiber im Systemkern müsste aus dem Quelltext übersetzt und nach jeder Aktualisierung des Kerns neu übersetzt werden. Eine zusätzliche Fehlerquelle. Ein Einfluss auf die drei USB-Kameras wurde geprüft und nicht festgestellt. Damit ist A23 auf der Seite des Funkbetriebs erfüllt.

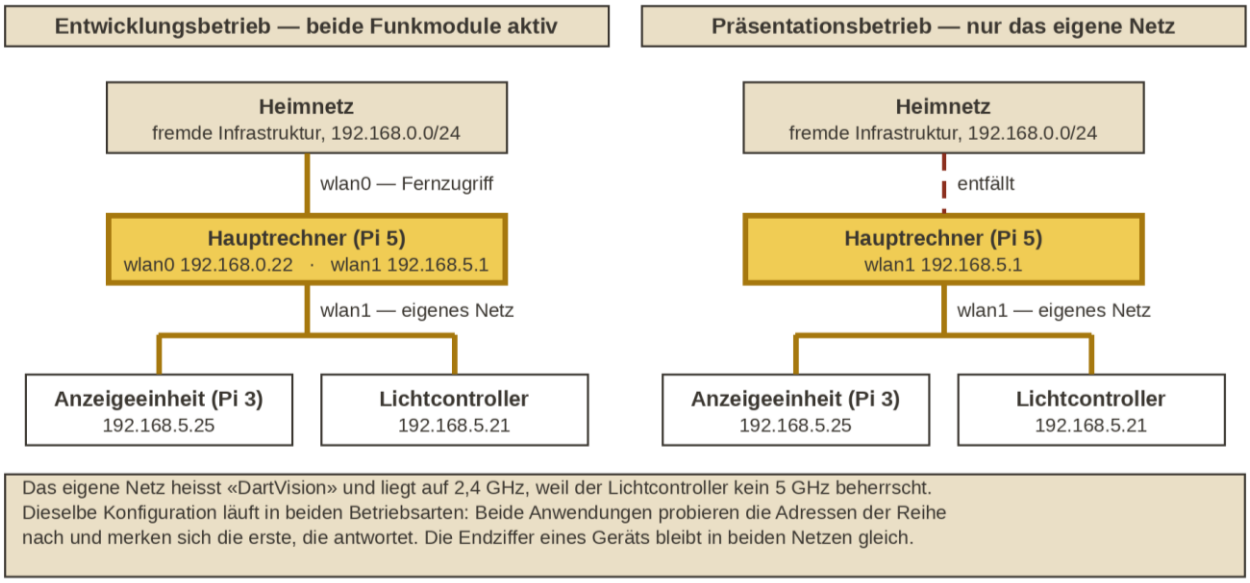


Abbildung 62: Der Netzaufbau im Entwicklungs- und im Präsentationsbetrieb

Zwei weitere Festlegungen folgen aus fremden Randbedingungen:

Festlegung	Grund
ein eigener Adressbereich für das eigene Netz statt desselben wie im Heimnetz	bei gleichzeitigem Betrieb beider Schnittstellen entstünden zwei widersprüchliche Wege für denselben Adressbereich
2,4 GHz erzwungen	der Mikrocontroller des Lichtcontrollers beherrscht kein 5 GHz

Tabelle 96: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funknetz

Die Einrichtung des eigenen WLANs erfolgte direkt über die Netzverwaltung des Betriebssystems. Zusätzliche Software für den Zugangspunkt oder die Adressvergabe war nicht nötig.
Dazu wurde das Profil «dartvision-ap» erstellt und fest dem zweiten Funkmodul zugeordnet. So wird das eigene WLAN immer über diese Schnittstelle aufgebaut, während das interne Modul für den Fernzugriff über das Heimnetz verfügbar bleibt.
Das WLAN arbeitet im 2,4-GHz-Band auf Kanal 6 und ist mit WPA2-Personal und AES geschützt.
Das Profil startet beim Hochfahren automatisch. Damit steht das DartVision-Netz nach dem Einschalten ohne manuelle Eingriffe zur Verfügung.

Die Anzeigeeinheit verbindet sich ebenfalls automatisch mit dem WLAN «DartVision» und bevorzugt dieses gegenüber dem Heimnetz. Der Lichtcontroller wurde über seine Weboberfläche mit Netzwerkname und Kennwort eingebunden.
Die Adressen der drei Geräte sind fest zugeteilt, über ihre Hardware-Kennungen. Ohne diese Zuteilung erhielte jedes Gerät bei jeder Anmeldung eine andere Adresse und die Adressliste aus Schritt 3 hätte nichts, worauf sie zeigen könnte.

Schritt 3 — Die Gegenstellen ohne Namensauflösung finden

Beide Anwendungen müssen eine Gegenstelle finden, deren Adresse vom Netz abhängt: die Anzeigeeinheit den Hauptrechner, der Hauptrechner den Lichtcontroller. Der übliche Weg wäre eine Namensauflösung. Alle drei dafür in Frage kommenden Dienste wurden geprüft und verworfen.

Weg	Befund
Namensdienst des Heimnetzes	trägt die Namen in eine eigene Domäne ein. In der Präsentation existiert dieser Dienst nicht
Namensauflösung im lokalen Netz ohne Server	findet den Lichtcontroller nicht
Namensdienst des eigenen Netzes	löst nur dort auf und mit einem anderen Namenszusatz

Tabelle 97: Ereignisfarben & Betriebsführung - Gegenstellen

Zwei Mechanismen mit verschiedenen Namenszusätzen nebeneinander wären anfällig und an der Präsentation nicht mehr überprüfbar. Gewählt ist deshalb eine geordnete Adressliste je Anwendung: Die Adressen werden der Reihe nach probiert, die erste antwortende wird gemerkt und für alle weiteren Aufrufe verwendet. Nach einem endgültigen Fehlschlag wird sie verworfen und beim nächsten Anlass neu gesucht.

Schritt 4 — Die Übertragung tragfähig halten

Phase 5 hat gezeigt, was übertragen wird. Dieser Schritt, was die Übertragung aushalten muss. A8 verlangt, dass der Spielzustand bei jeder Änderung vollständig übertragen wird und die Anzeige nach einem Verbindungsunterbruch mit der ersten Nachricht wieder stimmt. Nachzuweisen am Neustart der Anzeige im laufenden Spiel.
Der zweite Satz bestimmt die Bauform: Wer nach jedem Unterbruch mit einer einzigen Nachricht wieder stimmen muss, darf keine Änderungsmeldungen verschicken, sondern nur vollständige Zustände.

	Quittung je Änderung	vollständiger Zustand
Nachricht geht verloren	die Anzeige bleibt hängen und wartet auf eine Quittung, die nicht mehr kommt	die Anzeige findet mit dem nächsten Zustand von selbst zurück
Anzeige startet neu	sie kennt den Verlauf nicht und muss ihn erfragen	sie erhält beim Verbinden sofort den vollständigen Zustand

Tabelle 98: Ereignisfarben & Betriebsführung - Übertragung

A8 ist damit nicht durch eine Zusatzmassnahme erfüllt, sondern durch die Bauform. Dazu kommt ein Herzschlag: Alle drei Sekunden wird derselbe Zustand auch ohne Änderung erneut gesendet. Damit erkennt der Empfänger eine tote Verbindung und ein verpasster Zustand heilt sich von selbst.
Der Verbindungsabbruch gilt auf beiden Seiten als Normalfall und nicht als Fehlerfall. Der Hauptrechner entfernt abgebrochene Verbindungen, ohne den Dienst zu beenden. Die Anzeige versucht es unbegrenzt

alle zwei Sekunden erneut. Ein beim Einschalten noch nicht erreichbarer Hauptrechner ist der Regelfall, weil beide Geräte gleichzeitig starten. Gegen stille Datenfehler sichern zwei Vorkehrungen: Eine über zwei Pakete verteilte Nachricht wird zwischengespeichert statt verworfen und fehlerhaftes JSON wird verworfen und protokolliert, ohne die Verbindung zu beenden. Elf Prüffälle decken das ab und sind ohne Kamera und ohne Anzeigeeinheit lauffähig.

Schritt 5 — Den Ruhezustand einrichten

Nach dem Hochfahren steht die Anlage bedienbar, aber nicht spielbereit. Erst der Spielstart über das Display versetzt sie in den Spielbetrieb. Zwei Gründe tragen diesen zusätzlichen Betriebszustand: Der Ring auf Vollweiss ist einer der grössten Verbraucher des Aufbaus und die Kameraprüfung gehört an den Spielstart, weil sie gegen Referenzbilder vergleicht, die unter Vollweiss aufgenommen wurden.
Der Anlass dafür war eine Beobachtung. Die Kameraprüfung lieferte eine Ähnlichkeit von 0,382, wo sonst 0,8 bis 0,95 erreicht werden. Der knappste je gesehene Abstand. Die Ursache war nicht die Prüfung, sondern die Beleuchtung: Seit die Lichtsteuerung den Ring führt, entfällt das vorherige Setzen auf Vollweiss von Hand und beim Start leuchtet der Ring rot.

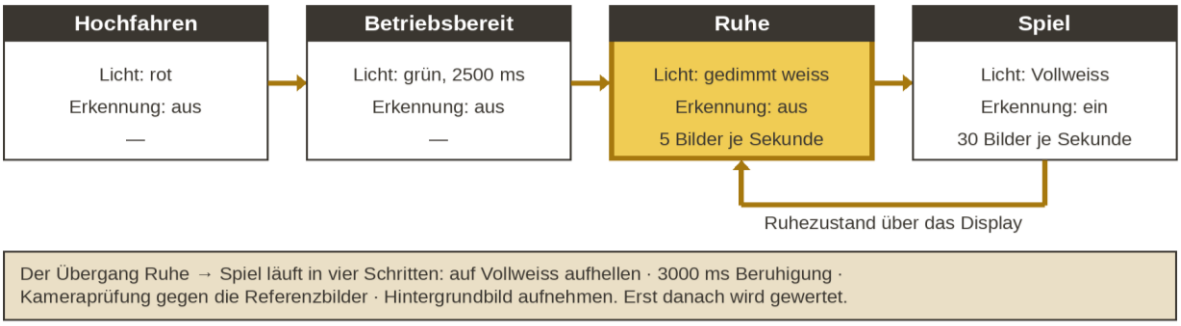


Abbildung 63: Die vier Betriebszustände und ihre Übergänge

Der Übergang vom Ruhezustand ins Spiel läuft deshalb in vier Schritten: auf Vollweiss aufhellen, 3000 ms Beruhigung, Kameraprüfung, Hintergrundbild. Die 3000 ms sind doppelt so lang wie die 1500 ms Beruhigung nach einem Lichtwechsel (Schritt 7) und der Grund ist ein anderer: Der Sprung von gedimmt auf Vollweiss ist ein Wärmesprung, nach dem sich die Helligkeit erst über einige Sekunden einpendelt. Nach einem Lichtwechsel kehrt die Beleuchtung dagegen zum Ausgangszustand zurück.
Fällt die Kameraprüfung schlecht aus, erscheint eine Warnung mit den Messwerten, keine Blockade. Eine vertauschte Kamerazuordnung erzeugt gespiegelte Punktzahlen ohne Fehlermeldung und muss auffallen. Aber der häufigste Grund für einen niedrigen Wert ist veränderte Beleuchtung.
Was der Ruhezustand tatsächlich einspart und was nicht, steht unter «Was dabei schiefging».

Schritt 6 — Den Spielereignissen Farben zuordnen

Die Zuordnung selbst ist kurz.

Ereignis	Lichtbild	Danach
Anwendungsstart	rot, bis die Anlage bereit ist	—
betriebsbereit	grün, 2500 ms	gedimmtes Weiss
Überwurf	rot, 2500 ms	Vollweiss
Sieg	grün, 5000 ms	Vollweiss
Spielerwechsel, Einzeltreffer	kein Lichtwechsel	—
Grundzustand im Spiel	Vollweiss — die Beleuchtung nach A15	—

Tabelle 99: Ereignisfarben & Betriebsführung - Farbzuordnung

Die beiden letzten Zeilen sind ein Entscheid, nicht die Aufzählung. Alle drei Quellen eines Überwurfs sind angebunden: die reguläre Wertung, der über eine Taste gesetzte Fehlwurf und die Korrektur über die Brücke.
Vier Eigenschaften hat die Lichtsteuerung und jede hat einen Grund.

Eigenschaft	Grund
Die Spiellogik ruft benannte Ereignisse auf. Farben, Zeiten und Übertragung bleiben in der Lichtsteuerung	die Spiellogik kennt keine Farben, die Lichtsteuerung keine Punkte
Nicht blockierend: jeder Lichtwechsel läuft in einem eigenen Programmfaden, der Aufruf kehrt sofort zurück	die Bildverarbeitung darf nie auf eine Antwort des Controllers warten
Fehlertolerant: ein nicht erreichbarer Controller wird protokolliert und hält das Spiel nie an. Beim Systemstart wird bis zu 30 Sekunden wiederholt	der Controller braucht länger zum Hochfahren als der Rechner und ein Rückmeldemittel darf die Anlage nicht aufhalten
Abschaltbar über eine Einstellung	ohne sie wäre keine Messreihe ohne Lichteinfluss möglich — die Vergleichsläufe der Phase 4 setzen das voraus

Tabelle 100: Ereignisfarben & Betriebsführung - Lichtsteuerung

Die Abhängigkeit zwischen Erkennung und Lichtsteuerung läuft nur in eine Richtung. Die Erkennungsschleife liest zwei Auskünfte aus der Lichtsteuerung: ob die Wertung gesperrt ist und ob nach einem Lichtwechsel ein neues Hintergrundbild fällig ist.

Schritt 7 — Die Wertung während eines Lichtwechsels sperren

Während eines Lichtwechsels und der anschliessenden Beruhigungszeit wird nicht gewertet. Die Beruhigungszeit ist nötig, weil Leuchtdioden ihre Helligkeit beim Umschalten nicht sofort erreichen. Ein zu früh aufgenommenes Hintergrundbild passt nicht zu dem Licht, unter dem anschliessend gemessen wird.

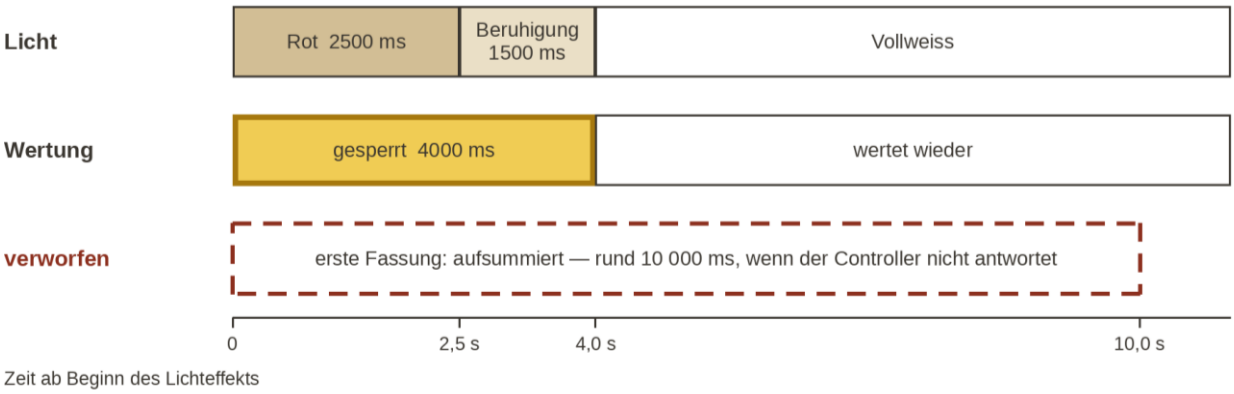


Abbildung 64: Lichtwechsel und Wertungssperre bei einem Überwurf

Fall	Lichtdauer	Beruhigung	Sperre
Überwurf	2500 ms	1500 ms	4000 ms
Sieg	5000 ms	1500 ms	6500 ms
obere Grenze	—	—	8000 ms

Tabelle 101: Ereignisfarben & Betriebsführung - Wertung

Die obere Grenze ist ein Notnagel gegen eine hängengebliebene Sperre. Sie liegt über dem längsten regulären Fall und greift im Normalbetrieb nie.
Gerechnet wird die Sperre einmal, beim Beginn des Lichtwechsels und als Ablaufzeitpunkt gesetzt, bevor der erste Aufruf an den Controller startet. Scheitert dieser erste Farbbefehl endgültig, wird die Sperre sofort gelöst: Hat kein Lichtwechsel stattgefunden, gibt es nichts zu beruhigen. Weshalb das so und nicht anders gerechnet wird, steht im nächsten Abschnitt.

Schritt 8 — Die Anlage ohne Laptop bedienen

Bis zu diesem Schritt liess sich die Anlage nur über eine Fernverbindung oder durch Trennen der Netzspannung ausschalten. Die Anzeigeeinheit trägt das einzige Bediengerät am Aufbau. Der Hauptrechner hat keine eigene Anzeige.
Umgesetzt ist ein Weg über die Brücke: Schaltfläche im Menü, Rückfrage, Befehl an den Hauptrechner, Warten auf dessen Bestätigung, anschliessend die Anzeigeeinheit selbst. Der Lichtring wird vorher ausgeschaltet. Er hängt nicht am Hauptrechner und bliebe sonst in Vollweiss stehen. Derselbe Weg trägt den Neustart beider Geräte.
Zwei Einzelheiten des Ablaufs sind festgehalten. Die erste ist die Reihenfolge: Zuerst wird geprüft, ob der Systemaufruf zum Herunterfahren durchgeht, und erst danach werden die Kameras freigegeben und die Brücke gestoppt. Umgekehrt könnte die Anwendung einen Fehlschlag des Aufrufs nicht mehr auffangen, weil sie nach dem Abbau selbst nicht mehr lauffähig wäre. Die zweite ist der Befehl: Für den Neustart wird einer verwendet, den die bestehende Berechtigungsregel bereits abdeckt. Solche Regeln gelten

befehlsgenau, ein gleichwertiger anderer Befehl hätte eine zweite Regeldatei verlangt und eine Berechtigungsdatei weniger ist eine Fehlerquelle weniger.
Tragend ist dabei ein Grundsatz: Die Anzeigeeinheit muss sich immer herunterfahren lassen, auch wenn der Hauptrechner nicht antwortet. Sonst bliebe in genau diesem Fall nur das harte Trennen, also das, was der ganze Schritt vermeiden soll.

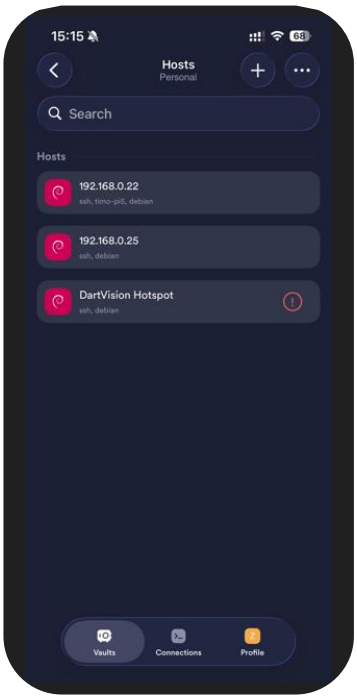


Abbildung 65: Zugriff über Termius

8.10.4 Was dabei schiefging

Drei Fehler tragen diese Phase. Alle drei wurden am Gerät gemessen.

Erster Fehler: Die Sperre hing an der Laufzeit der Netzaufrufe

Bei einem Überwurf antwortete der Lichtcontroller nicht und die Wertung blieb rund 10 000 ms gesperrt statt der vorgesehenen 4000: Die erste Fassung summierte die Einzelschritte auf und hing damit an der Laufzeit der Aufrufe.
Der Fehler ist nicht die Zahl, sondern die Bezugsgrösse. Eine Sperre soll so lange dauern, wie das Licht anders ist, nicht so lange, wie die Übertragung braucht. Beides fällt im Normalbetrieb zusammen und läuft genau im Störungsfall auseinander, in dem eine überlange Sperre am meisten schadet. Die Dauer wird deshalb einmal zu Beginn aus den eingestellten Zeiten gerechnet und gegen die obere Grenze beschnitten:

```
def lock_duration_ms(duration_ms: int, settle_ms: int, max_lock_ms: int) -> int:
    return min(max(0, duration_ms) + max(0, settle_ms), max(0, max_lock_ms))
```

Keiner der drei Werte stammt aus einer Messung der Laufzeit. Dazu kommt die Zusatzregel aus Schritt 7: Scheitert der Farbbefehl zu Beginn endgültig, wird die Sperre sofort gelöst.

Zweiter Fehler: Der Herzschlag machte einen eingestellten Wert wirkungslos

Das Überwurf-Banner blieb deutlich länger stehen als eingestellt. Die Ursache lag beim Auslöser: Die Anzeige startete den Zeitgeber neu, sobald ein Spielzustand mit gesetztem Überwurf-Kennzeichen eintraf und der Herzschlag aus Schritt 4 lieferte genau diesen Zustand alle drei Sekunden erneut.
Die Umstellung auf die Änderung des Kennzeichens erzeugte einen Folgefehler: Bei zwei Überwürfen hintereinander entsteht kein Wechsel und das Banner erscheint beim zweiten Mal nicht. Die Lösung ist ein Zähler, der bei jedem Überwurf steigt und nie zurückgesetzt wird:

```
count = state.bust_count
if count is not None:
    previous, self._last_bust_count = self._last_bust_count, count
    if previous is None:
        return bool(state.bust)
    return count > previous
```

Dritter Fehler: Der Ruhezustand sparte fast nichts

Der Lüfter des Hauptrechners lief auch im Ruhezustand hoch. Die daraufhin erhobene Messung zeigt, weshalb.

Zustand	Prozessorlast	Temperatur
Spielbetrieb	127–230 %	—
Ruhezustand, vor der Änderung	154–180 %	65–67 °C
Ruhezustand, nach der Absenkung	0–145 %, Mittel rund 100 %	63–65 °C

Tabelle 102: Ereignisfarben & Betriebsführung - Fehler 3

Die ersten beiden Zeilen zeigen denselben Bereich. Der Ruhezustand schaltete die Wertung ab, nicht die Bilderfassung und die Wertung macht nur einen kleinen Teil der Last aus: Die Linsenkorrektur läuft bei jedem einzelnen Bild, dreimal 1280 × 720, dreissigmal je Sekunde. Der Ruhezustand war damit eine Lichtsparmassnahme und keine Rechensparmassnahme. Beabsichtigt war das nicht.
Gewählt wurde das Absenken der Bildrate der gesamten Schleife: Es erfasst Lesen, Dekodieren, Entzerren und Anzeigen in einem Eingriff statt an vier Stellen, die Kameras bleiben offen und der Spielstart dauert nicht länger. Im Ruhezustand liest die Anlage mit 5 statt 30 Bildern je Sekunde und der Lüfter wurde hörbar leiser. Ausgenommen sind die Brückenbefehle, die in einem eigenen Programmfaden laufen und das Leeren des Kamerapuffers beim Verlassen des Ruhezustands, das auf fünf Aufrufe je Kamera und 500 ms begrenzt ist.
Die Ersparnis fiel geringer aus, als eine Absenkung von 30 auf 5 Bilder erwarten lässt.

8.10.5 Ergebnis und bekannte Grenzen

Die Anlage ist nach dieser Phase eigenständig. Beide Rechner starten selbstständig, spannen ihr Netz auf, finden einander, melden Spielereignisse am Board zurück und lassen sich am Display abschalten.

Gegenstand	Stand
Selbststart beider Rechner	umgesetzt, am Gerät abgenommen
eigenes Funknetz mit vier Teilnehmern	umgesetzt, vollständiges Spiel darin gelaufen
Adressliste statt Namensauflösung	umgesetzt, beide Gegenstellen gefunden
Ereignisfarben mit Wertungssperre	umgesetzt, Messreihe mit 24 von 24 Würfen gegengeprüft
Ruhezustand mit abgesenkter Bildrate	umgesetzt, Last und Temperatur gemessen
Abschalten und Neustarten über Display	umgesetzt, am Gerät abgenommen

Tabelle 103: Ereignisfarben & Betriebsführung - Ergebnis

Die Funkstrecken sind gemessen: 0 Prozent Verlust bei durchschnittlich 16 ms zur Anzeigeeinheit und 28 ms zum Lichtcontroller. Einzelne Spitzen bis 130 ms sind bekannt und für diese Anwendung ohne Bedeutung.
Eine Grenze ist bekannt und benannt.

Grenze	Inhalt
die Ersparnis des Ruhezustands ist nicht erklärt	vermutet wird, dass die Kameras weiterhin mit voller Rate liefern und der Treiber seinen Puffer füllt; als optionale Messung erfasst

Tabelle 104: Ereignisfarben & Betriebsführung - Grenzen

8.10.6 Abschluss der Phase

Die Phase ist abgeschlossen. Die Anlage wird eingeschaltet und ist ohne weiteren Eingriff bedienbar. Sie braucht kein fremdes Netz, keinen Laptop und keine Fernverbindung. Die Spielereignisse sind am Board zu sehen und die Erkennung ist dabei nicht schlechter geworden, weil jeder Lichtwechsel die Wertung so lange anhält, wie das Licht anders ist.
Der Nachweis zum Startverhalten und zum eigenen Funknetz wird im Prüfprotokoll P-02 geführt, der Nachweis zum Verhalten über die Dauer (Drosselung, Temperatur und Ruhezustand) in P-07. Beide gehören zu Phase 7, die nichts mehr baut und nur noch misst.

8.11 Phase 7 - Evaluation der funktionalen und technischen Anforderungen

Vorüberlegungen und Nachweisführung

Das Pflichtenheft führt 25 Anforderungen A1 bis A25. Sie beschreiben, was die Anlage können muss. Vom Erkennen eines Wurfs über die Bedienung am Display bis zur Energieversorgung. Daneben stehen die sieben Erfolgskriterien K1 bis K7, die den Erfolg des Projekts als Ganzes messen. Sie werden in einem eigenen Kapitel behandelt. Dieses Kapitel behandelt ausschliesslich die Anforderungen.
Vor dem Nachweis standen drei Entscheide, die den ganzen Ablauf geprägt haben.

Protokollieren statt vorführen

Die Anforderungsliste sah ursprünglich für zwölf Anforderungen die Vorführung am Prüfungstermin als Nachweisform vor. Mit dem Dozenten wurde vereinbart, dass alle Prüfungen vorgängig durchgeführt und protokolliert werden. Die Zeit für die Präsentation ist begrenzt und reicht für zwölf Vorführungen nicht aus. Damit brauchte jede dieser zwölf Anforderungen ein schriftliches Protokoll und der Umfang der Nachweisarbeit verdoppelte sich gegenüber der ursprünglichen Planung.

Ein Protokoll je Prüfgegenstand, nicht je Anforderung

Fünfundzwanzig Protokolle für fünfundzwanzig Anforderungen wären weder zu schreiben noch zu lesen gewesen und sie hätten dieselbe Messung mehrfach beschrieben. Eine einzige Strommessung belegt die Auslegung des Netzteils (A24) und zugleich die zentrale Energieversorgung (A20). Umgekehrt braucht eine Anforderung manchmal zwei Wege: Dass eine Korrektur regelkonform wirkt (A12), ist einmal im Quelltext geprüft und einmal am Gerät unter dem Finger. Aus den 25 Anforderungen wurden deshalb acht Protokolle.

Eine Anforderung lässt sich nicht prüfen

A21 verlangt, dass die Komponentenauswahl anhand einer dokumentierten Evaluation erfolgt. Das ist kein Verhalten der Anlage, das sich messen liesse, sondern eine Eigenschaft des Vorgehens. Ihr Nachweis ist die Evaluation in dieser Dokumentation. Sie ist die einzige der 25, für die kein Protokoll möglich ist.

8.11.1 Prüfplan und Prüfphasen

Der Prüfplan wurde vor der ersten Messung geschrieben. Er gliedert den Nachweis in acht Phasen und jede Phase entspricht einem Protokoll. Der tragende Gedanke ist die Reihenfolge: Eine Phase wurde erst begonnen, wenn die vorhergehende bestanden war.

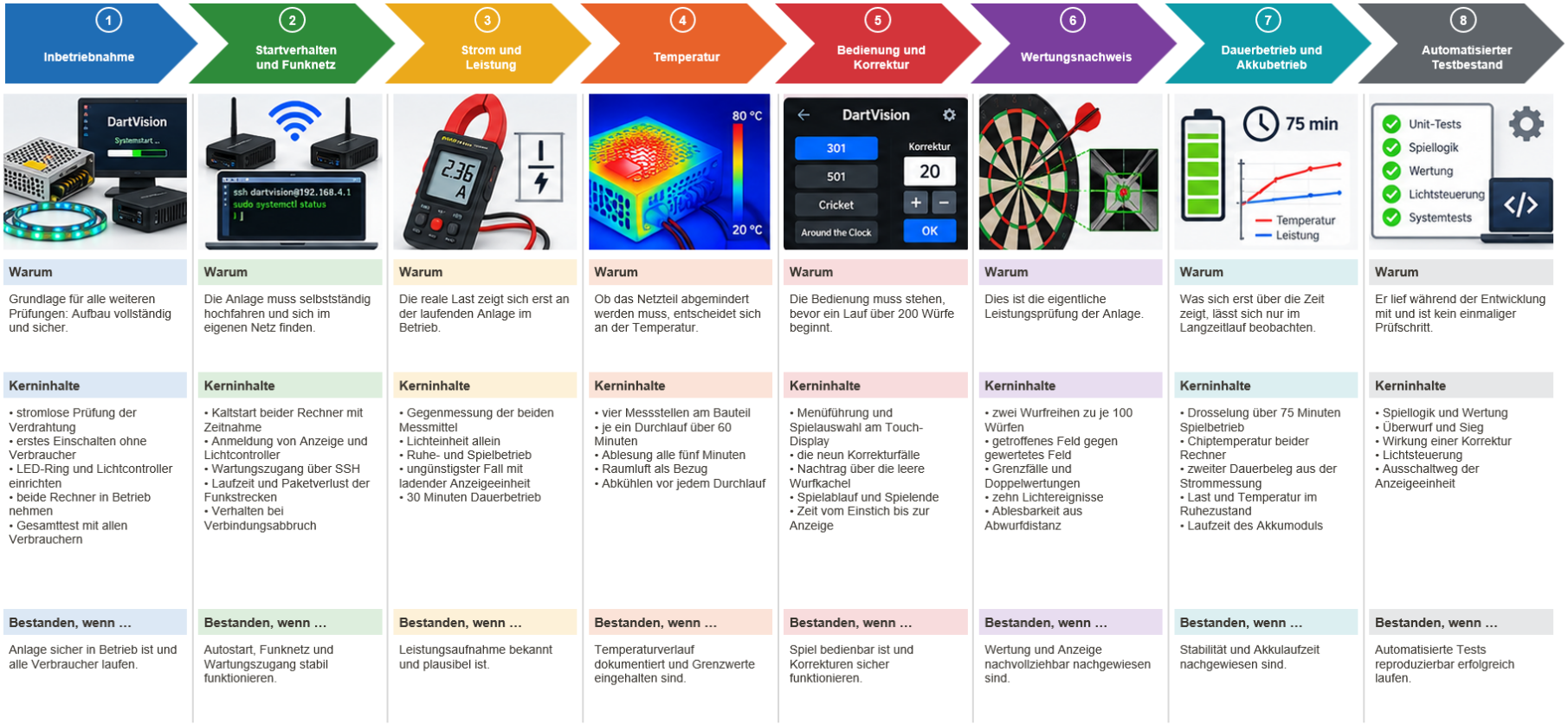


Abbildung 66: Prüfplan

8.11.2 Von den Anforderungen zu den acht Protokollen

Protokoll	Anforderungen
P-01 Inbetriebnahme	A20 · A23 · A24
P-02 Startverhalten und Funknetz	A5 · A8 · A17 · A18 · A19 · A22
P-03 Strom und Leistung	A20 · A24
P-04 Temperatur	A20 · A24
P-05 Bedienung und Korrektur	A1 · A4 · A6 · A9 · A10 · A11 · A12 · A13 · A25
P-06 Wertungsnachweis	A2 · A3 · A14 · A15 · A16
P-07 Dauerbetrieb und Akkubetrieb	A23
P-08 Automatisierter Testbestand	A7 · A12

Tabelle 105: Auswertung - Anforderungen

Die Nummerierung folgt der Abhängigkeit. P-03 misst den Strom an einer Anlage, die laufen muss. Also steht die Inbetriebnahme davor. P-04 rechnet die Abminderung des Netzteils gegen die gemessene Leistung. Also steht die Strommessung davor. Was ein Protokoll voraussetzt, bestimmt seinen Platz.

8.11.3 Zusammenfassung der Testprotokolle

Je Protokoll stehen die Grössen, auf die es für die Anforderungen ankommt, mit ihrem Sollwert und ihrem Ergebnis nebeneinander. Die vollständigen Messreihen stehen im Anhang.

P-01 — Inbetriebnahme

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Stromlose Prüfungen	alle bestanden	7 von 7
Prüfungen Zuschalten der Verbraucher	alle bestanden	13 von 13
Sollwerte des Gesamttests	alle eingehalten	10 von 10
Prüfschritte, die zum Abbruch führten	keiner	keiner

Tabelle 106: Auswertung - Inbetriebnahme

P-02 — Startverhalten und Funknetz

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Zeit bis zur Spielbereitschaft	höchstens 3 Minuten	Max. 56 Sek. Heimnetz Max. 121 Sek. Eigenes Netz
Startdurchgänge mit Eingriff	keiner	keiner von zwölf
Paketverlust beider Funkstrecken	stabile Verbindung	0 Prozent
Laufzeit zum Lichtcontroller	Befehle <1 Sek. wirksam	28 ms im Mittel
Bildrate, drei Kameras gleichzeitig	rund 30 Bilder je Sekunde	3 × 30 über 436 Sekunden
Spielabbruch bei Verbindungsabbruch	keiner	keiner von drei

Tabelle 107: Auswertung - Startverhalten/Funknetz

P-03 — Strom und Leistung

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Höchster Gesamtstrom der 5-V-Schiene	höchstens 9 A, Ziel unter 8 A	5,98 A
Ausnutzung des Netzteils	—	59,8 % des Nennstroms
Abweichung der beiden Messmittel	—	unter 0,6 Prozent
Drosselung über 30 Minuten Spielbetrieb	keine	keine

Tabelle 108: Auswertung - Strom/Leistung

P-04 — Temperatur

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Gehäusetemperatur des Netzteils	deutlich unter 70 °C	36,5 °C
Abstand zum Sollwert	—	33,5 K
Höchste Übertemperatur aller Messstellen	—	18,0 K über der Raumluft
Abminderung der Nennleistung nötig	—	nein

Tabelle 109: Auswertung - Temperatur

P-05 — Bedienung und Korrektur

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Nicht erkannte Würfe	alle, mit dem richtigen Feld	10 von 10
Davon mit Spielabbruch	keiner	keiner
Korrekturfälle am Gerät	alle bestanden	9 von 9
Punkte zum Spielablauf	alle bestanden	8 von 8
Zeit vom Einstich bis zur Anzeige	höchstens 5 Sek.	längstens 3,5 Sek.
Bedienung ohne Tastatur und Maus	durchgehend	über den ganzen Lauf

Tabelle 110: Auswertung - Bedienung/Korrektur

P-06 — Wertungsnachweis

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Trefferquote über 200 Würfe	mindestens 80 Prozent	90%, 180 von 200
Doppelwertungen	keine	0 von 200
Lichtereignisse mit richtiger Farbe	mindestens 8 von 10	10 von 10
Dauerlicht im Spielbetrieb	konstant weiss	konstant
Ablesbarkeit aus 2,37 m	lesbar	3 von 3 Durchgängen

Tabelle 111: Auswertung - Wertungsnachweis

P-07 — Dauerbetrieb

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Ablesungen des Drosselungsregisters	durchgehend ohne Eintrag	14 von 14
Höchste Chiptemperatur beider Rechner	unter 80 °C	64,3 °C
Spielbetrieb unter Beobachtung	—	75 Minuten

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Spielabbruch wegen eines Systemausfalls	keiner	keiner

Tabelle 112: Auswertung - Dauerbetrieb

P-08 — Automatisierter Testbestand

Grösse	Sollwert	Ergebnis
Prüffälle insgesamt	Regeln nach K3 abgedeckt	487 in 28 Testdateien
Davon Erkennungseinheit	—	299 in 22 Dateien
Davon Anzeigeeinheit	—	188 in 6 Dateien
Wann der Bestand läuft	bei jeder Änderung am Quelltext	während der ganzen Entwicklung

Tabelle 113: Auswertung - automatisierte Tests

8.11.4 Abdeckung A1 bis A25

A-Nr.	Was sie verlangt	Nachweis in	Bewertung
A1	Anzeige der Wertung innerhalb von 5 s nach dem Einstich	P-05	bestanden
A2	Zuordnung zu Segment und Ring, mindestens 80 Prozent	P-06	bestanden
A3	Das Ziehen der Darts erzeugt keine zusätzliche Wertung	P-06	bestanden
A4	Eine Aufnahme umfasst drei Darts; danach wartet das System auf das Entfernen	P-05	bestanden
A5	Prüfung der Kamerazuordnung vor dem Spielstart, Warnung bei Abweichung	P-02	bestanden
A6	Spielvarianten 501 und 301, ein oder zwei Spieler, Double-Out zuschaltbar	P-05	bestanden
A7	Überwurf stellt den Reststand zurück; Sieg nur regelkonform	P-08	bestanden
A8	Zustand vollständig an die Anzeige übertragen, auch nach Verbindungsabbruch	P-02	bestanden
A9	Jeder Dart korrigierbar: Wert ändern, als Fehlwurf setzen, löschen	P-05	bestanden
A10	Ein nicht erkannter Dart lässt sich über die leere Wurfkachel nachtragen	P-05	bestanden
A11	Nach dem Spielerwechsel bleibt die letzte Aufnahme korrigierbar	P-05	bestanden
A12	Korrekturen wirken regelkonform, im Quelltext und am Gerät	P-05 · P-08	bestanden
A13	Nach Spielende neues Spiel oder Rückkehr ins Menü	P-05	bestanden
A14	Vollbild, Punktestände aus Abwurfdistanz ablesbar	P-06	bestanden
A15	Im Spielbetrieb leuchtet das LED-Band konstant weiss als Kamerabeleuchtung	P-06	bestanden
A16	Definierte Ereignisse lösen Farbeffekte aus, mindestens 8 von 10	P-06	bestanden
A17	Eigenes WLAN; Anzeige und Lichtcontroller verbinden sich selbsttätig	P-02	bestanden
A18	Nach dem Einschalten starten alle Teilsysteme selbstständig	P-02	bestanden
A19	Ein Laptop kann sich zu Wartungszwecken über SSH verbinden	P-02	bestanden
A20	Zentrales Netzteil mit abgesicherter Verteilung, ein Netzanschluss	P-01 · P-03 · P-04	bestanden
A21	Komponentenauswahl anhand einer dokumentierten Evaluation	Kapitel 7	belegt

A-Nr.	Was sie verlangt	Nachweis in	Bewertung
A22	Kameraauflösung trägt K2; drei Kameras gleichzeitig betreibbar	P-02	bestanden
A23	Drei Kamerabilder gleichzeitig und zugleich ein Funkzugangspunkt	P-01 · P-07	bestanden
A24	Netzteil auf den maximalen Gesamtstrom ausgelegt, rechnerisch und gemessen	P-01 · P-03 · P-04	bestanden
A25	Touch-Display, ohne zusätzliche Eingabegeräte bedienbar	P-05	bestanden

Tabelle 114: Auswertung - Abdeckung Anforderungen

8.11.5 Gesamtauswertung

Alle Prüfungen sind wie geplant durchgeführt, einzeln protokolliert und bestanden worden. Vierundzwanzig der fünfundzwanzig Anforderungen sind in einem der acht Protokolle mit Messwert, Sollwert und Ergebnis nachgewiesen. Die fünfundzwanzigste ist durch die dokumentierte Evaluation in Kapitel 7 belegt, weil sie sich nicht messen lässt. Keine Anforderung ist offengeblieben und keine ist unbelegt übernommen worden. Die acht Protokolle stehen vollständig im Anhang.

8.12 Kosten-Nutzen-Analyse

Mit der Kosten-Nutzen-Analyse wird geprüft, ob der erreichte Nutzen von DartVision in einem sinnvollen Verhältnis zu den eingesetzten Mitteln steht. Grundlage sind die effektiven Materialkosten aus der Stückliste und die Ergebnisse der durchgeführten Tests.

Umfang	Kosten
DartVision ohne Dartscheibe und Ständer	518.02 CHF
DartVision mit Dartscheibe	568.02 CHF
Vollständiger Aufbau mit Dartscheibe und Ständer	648.02 CHF

Tabelle 115: Auswertung - Kosten-Nutzen-Analyse

Für den eigentlichen DartVision-Aufbau entstehen damit Kosten von 518.02 CHF. Dartscheibe und Ständer werden separat ausgewiesen, da diese bei einem bestehenden Dartplatz bereits vorhanden sein können. Die eigene Arbeitszeit wird nicht in Franken bewertet, da es sich um ein privates Diplomprojekt ohne festgelegten Stundenansatz handelt.

Der Nutzen liegt vor allem darin, dass ein eigenständiges und betriebsbereites System entstanden ist. Die geforderte Erkennungsquote wurde im Test übertroffen und das System arbeitet ohne Internetverbindung, Benutzerkonto oder Abonnement. Durch das eigene WLAN kann DartVision unabhängig von einer vorhandenen Netzwerkinfrastruktur eingesetzt werden. Die LED-Beleuchtung übernimmt gleichzeitig die Kamerabeleuchtung und zeigt wichtige Spielereignisse an.

Im Vergleich zu einem gewerblichen System zeigt sich auch ein finanzieller Vorteil. Das in der Marktanalyse betrachtete Scolia-System kostet ohne Dartscheibe und Ständer rund 987 CHF. DartVision liegt auf vergleichbarer Grundlage bei 518.02 CHF und damit rund 469 CHF tiefer. Der Vergleich zeigt, dass die gesetzten Projektziele mit einem deutlich geringeren Materialaufwand erreicht werden konnten.

https://scoliadarts.com/de/product/scolia-home/

9 Projektabschluss

Dieses Kapitel schliesst die Arbeit ab. Es vergleicht die erreichten Endergebnisse mit den Erfolgskriterien, blickt auf den Weg dorthin zurück, hält fest, was dabei zu lernen war und sagt, was daraus für eine zweite Prototypenstufe folgt.
Die Reihenfolge ist Absicht. Was die Anlage kann, steht in den Fachkapiteln. Was sie erfüllt, steht in 9.1, wie sie dorthin gekommen ist, steht in 9.2 und 9.3. Der Ausblick in 9.4 ist deshalb kein Wunschzettel, sondern die Fortsetzung dessen, was die Arbeit gezeigt hat.

9.1 Evaluation der Zielerreichung

Die Aufgabenstellung nennt sieben Endergebnisse, jedes mit einem eigenen Erfolgskriterium. Die Belege stammen aus den acht Prüfprotokollen.

E1 — Hardware-Prototyp

Endergebnis	Erfolgskriterium
Betriebsbereiter Aufbau: Dartscheibe mit drei kreisförmig angeordneten Kameras, Mikrocomputer, Touch-Display und ansteuerbares LED-Band; zentrale, abgesicherte Kleinspannungsversorgung mit einem Netzanschluss.	Der Hardware-Prototyp ist vollständig aufgebaut und betriebsbereit; alle drei Kameras, das Display und das LED-Band werden vom System angesteuert.

Auswertung

Der Aufbau steht vollständig und ist abgenommen. Über 75 Minuten Dauerbetrieb lief die Anlage ohne Abbruch, die Anzeige über den ganzen Lauf in Betrieb, das Lichtband über alle Ereignisse angesteuert. Dass alle drei Kameras gleichzeitig arbeiten, ist über eine Bildratenmessung von 436 Sekunden mit je rund 30 Bildern je Sekunde belegt. Die Kleinspannungsversorgung läuft über ein Netzteil an einem Netzanschluss, mit Vorsicherung auf der Netzseite und abgesicherter Verteilung.

Bewertung: Erfüllt

E2 — Erkennungssoftware

Endergebnis	Erfolgskriterium
Automatische Erkennung der Dartpfeile aus den drei Kamerabildern und Zuordnung zur Wertungszone auf Basis einer kalibrierten Boardgeometrie.	In einem definierten Testlauf von 25 Würfen werden mindestens 80 Prozent der regulär geworfenen Pfeile korrekt der Trefferzone zugeordnet, nach Segment und Ring.

Auswertung

Gefordert sind 80 Prozent bei 25 Würfen. Gemessen sind 90 Prozent bei 200 Würfen. Das Achtfache der geforderten Stichprobe, mit einem Abstand von 10 Prozentpunkten zum Kriterium. Über den Dauerbetrieb von 75 Minuten trat keine einzige Doppelwertung auf.

Bewertung: Erfüllt

E3 — Spiellogik

Endergebnis	Erfolgskriterium
Spielvarianten 501 und 301 für ein bis zwei Spieler mit automatischer Punktestandführung, Überwurf- und Double-Out-Regeln.	Die Varianten 501 und 301 laufen für ein bis zwei Spieler regelkonform einschliesslich Überwurf- und Double-Out-Regel; der Punktestand wird über ein vollständiges Testspiel hinweg korrekt geführt.

Auswertung

Beide Varianten liefen im Wertungsnachweis, als Ein- und als Zweispielerspiel, mit Double-Out und mit Single-Out. Dazu ein vollständiges Testspiel über 301 mit zwei Spielern, 40 Würfe, ein Sieg, der Punktestand durchgehend korrekt. Überwurf- und Siegregel sind zusätzlich im automatisierten Testbestand mit eigenen Prüffällen geführt und die Korrektur erzeugt und entfernt beide regelkonform.

Bewertung: Erfüllt

E4 — Bedienoberfläche

Endergebnis	Erfolgskriterium
Touch-Bedienung auf dem Display: Menü mit Spielauswahl, Spielansicht mit Punktestand, Wurfanzeige, Ausschecktipp und Durchschnitt; manuelle Korrektur jedes Darts der laufenden Aufnahme einschliesslich Nachtragen nicht erkannter Würfe und Erfassen von Fehlwürfen — ohne Spielabbruch.	Menü und manuelle Korrektur sind am Touch-Display bedienbar; ein Fehlwurf oder Erkennungsfehler lässt sich ohne Spielabbruch korrigieren, nachtragen oder als Fehlwurf erfassen.

Auswertung

Menü, Spielansicht, Wurfanzeige, Ausschecktipp und Durchschnitt sind umgesetzt und über den gesamten Wertungsnachweis hinweg bedient worden. Alle drei vom Kriterium genannten Vorgänge, einen gewerteten Dart korrigieren, einen nicht erkannten nachtragen, einen Fehlwurf erfassen, laufen über denselben Korrekturdialog und sind im Bedienprotokoll P-05 festgehalten, jeder ohne Spielabbruch. Seither ist die Anlage mehrfach über mehrere Stunden bespielt worden, ohne dass einer der drei Wege versagt hätte.

Bewertung: Erfüllt

E5 — Ereignisfarben

Endergebnis	Erfolgskriterium
Farbliche Rückmeldung definierter Spielereignisse über das LED-Band; im Spielbetrieb dient das Band als konstante Kamerabeleuchtung.	Die definierten Spielereignisse lösen in mindestens 8 von 10 Fällen die jeweils korrekte LED-Farbe aus.

Auswertung

Gefordert sind 8 von 10, erreicht sind 10 von 10. Überwurf Rot über 2500 ms, Sieg Grün über 5000 ms, je mit erwarteter und beobachteter Farbe festgehalten. Der Wechsel zwischen Vollweiss und Ruhezustand traf ebenfalls 10 von 10. Geprüft wurde nicht an zehn ausgewählten Auslösungen, sondern über den Dauerbetrieb von 75 Minuten.

Bewertung: Erfüllt

E6 — Autarker Betrieb

Endergebnis	Erfolgskriterium
Eigenes WLAN, das die Erkennungseinheit aufspannt und in dem sich Anzeigeeinheit und Lichtcontroller selbsttätig anmelden; alle Teilsysteme starten nach dem Herstellen der Netzspannung selbstständig.	Das System läuft im eigenen Funknetz ohne fremde Netzwerkinfrastruktur und ist nach dem Herstellen der Netzspannung ohne weitere Eingriffe innerhalb von drei Minuten spielbereit.

Auswertung

Beide Aussagen des Kriteriums sind getrennt belegt. Die Startzeit ist je dreimal gemessen: Anzeigeeinheit 49, 53 und 54 Sekunden, Erkennungseinheit 120, 115 und 121 Sekunden. Der längste Wert liegt bei 121 Sekunden und damit bei rund zwei Dritteln der zugelassenen drei Minuten. Das eigene Funknetz ist im Betrieb nachgewiesen: Ein vollständiges Spiel mit allen vier Teilnehmern lief mit Erkennung, Brücke, Anzeige und Lichtereignissen und beide Gegenstellen wurden ohne Änderung der Konfiguration gefunden.

Bewertung: Erfüllt

E7 — Projektdokumentation

Endergebnis	Erfolgskriterium
Konzept, Plattform-Evaluation, Aufbau- und Schaltungsübersicht und Testprotokoll.	Die Dokumentation liegt vollständig vor und ermöglicht das Nachvollziehen und den Nachbau des Systems.

Auswertung

Alle vier genannten Stücke liegen vor: Konzept und Plattform-Evaluation, die Aufbau- und Schaltungsübersicht mit der Verdrahtungsübersicht und die acht Prüfprotokolle mit Bedingungen, Messmitteln und Werten. Dazu die Stückliste mit Typ, Kenngrössen und Bezugsquelle, die Lastbilanz mit vollständigem Rechenweg und die Anforderungstabelle A1 bis A25 mit ihrem Erfüllungsnachweis. Für einen Nachbau tragen namentlich die Stückliste, der mechanische Aufbau mit den gedruckten Teilen, die Energieversorgung mit Querschnitten und Verdrahtung, die Erkennungskette in ihren Stufen und die Prüfprotokolle, die sagen, woran ein Nachbau zu messen ist.

Bewertung: Erfüllt

Das Richtziel

Das Richtziel verlangt einen funktionsfähigen, betriebsbereiten Prototyp eines kamerabasierten Dart-Auswertungssystems auf Mikrocomputerbasis: Er erkennt geworfene Pfeile automatisch, ordnet sie der korrekten Wertungszone zu, führt den Spielstand für 501 und 301 für ein bis zwei Spieler zuverlässig und regelkonform, meldet Spielereignisse über Touch-Display und LED-Band zurück und arbeitet autark in einem eigenen Funknetz, ohne Eingriff nach dem Einschalten.

Das Richtziel ist erreicht. Alle sieben Endergebnisse sind erfüllt und jedes der sieben Erfolgskriterien wird erreicht: 90 statt der geforderten 80 Prozent, bei der achtfachen Stichprobe; 10 statt 8 von 10 Lichtereignissen; 121 Sekunden statt der zugelassenen drei Minuten. Der Punktestand war über jede geprüfte Aufnahme regelkonform und die Anlage ist seit dem Nachweis mehrfach über Stunden bespielt worden.

9.2 Reflexion

Weg zum Ziel

Die laufende Planung und Kontrolle war für den Projektverlauf entscheidend. Projektstrukturplan, Ablaufplan und Terminplan wurden während der ganzen Arbeit regelmässig mit dem tatsächlichen Stand verglichen. Dadurch war jederzeit ersichtlich, welche Arbeitspakete noch offen waren, wovon sie abhingen und wo Blockaden bestanden.
Wichtig war auch die Einarbeitung vor der eigentlichen Umsetzung. Bildverarbeitung und Oberflächenentwicklung waren zu Beginn neu. Deshalb wurden zuerst Videokurse und kleine lauffähige Beispiele genutzt. Einzelne Funktionen konnten so verstanden und getestet werden, bevor sie in DartVision eingesetzt wurden.
Sicherheit brachte der vorgängig erstellte Prüfplan. Die Inbetriebnahme erfolgte in acht Phasen mit klaren Rahmenbedingungen. Eine neue Phase begann erst, wenn die vorherige abgeschlossen war. Die erste Prüfung erfolgte stromlos, danach wurden die Verbraucher einzeln zugeschaltet. Dadurch liessen sich Verdrahtungsfehler erkennen, bevor die gesamte Anlage eingeschaltet wurde.
Der strukturierte Aufbau ermöglichte ausserdem paralleles Arbeiten. Während an der Erkennung gearbeitet wurde, entstand die Bedienoberfläche. Während des mechanischen Aufbaus konnte gleichzeitig die Dokumentation weitergeführt werden.
Auch das Festhalten des Projektverlaufs war wichtig. Die Versionsverwaltung hielt funktionsfähige Softwarestände fest, während das Projekttagebuch vor allem Entscheide, Probleme und Lösungswege dokumentierte. Dadurch blieb nachvollziehbar, wie einzelne Lösungen entstanden sind und auf welchen Stand bei Problemen zurückgegriffen werden konnte.

Was den Verlauf aufgehalten hat

Zwei Begebenheiten haben den Projektverlauf gebremst.

- Der Aufbau des eigenen Funknetzes scheiterte viermal. Bei jedem Versuch ging der Fernzugriff verloren, wodurch gerade während des Fehlers die Protokolle nicht erreichbar waren. Gelöst wurde das Problem schliesslich mit einem zweiten Funkmodul.
- Auch die Doppelwertung jedes Darts benötigte vier Lösungsversuche. Drei davon scheiterten, weil zunächst an der falschen Grösse gemessen wurde.

Die grössten Schwierigkeiten entstanden beim eigenen Funknetz und bei der Bildverarbeitung, also in Bereichen, die über die bisherigen Ausbildungsinhalte hinausgingen. Dem gegenüber stehen Energieversorgung, mechanischer Aufbau, Verdrahtung, Lastberechnung und Messtechnik. Diese Arbeitspakete konnten deutlich schneller als geplant abgearbeitet werden.

Fehlersuche als eigene Arbeitsweise

Der grösste einzelne Zeitverlust dieser Arbeit ist nicht beim Bauen entstanden, sondern beim Suchen. Und zwar dort, wo nicht strukturiert genug gesucht wurde.
Das deutlichste Beispiel ist die vertauschte Kamerazuordnung. Die Gerätenummern der drei Kameras sind nicht startfest und alle drei melden dieselbe Seriennummer. Eine Vertauschung erzeugt keine Fehlermeldung, sondern ausschliesslich gespiegelte Punktzahlen. Gesucht wurde zunächst dort, wo die falschen Zahlen auffielen. In der Wertung und in der Kalibrierung. Dort war nichts zu finden, weil dort nichts falsch war.

Was geholfen hat, war jedes Mal dasselbe: zuerst die vorhandenen Daten auswerten, dann eine Vermutung so formulieren, dass sie widerlegbar ist und erst danach etwas ändern.

Die Zusammenarbeit mit den Beteiligten

Die Arbeit ist in Einzelarbeit entstanden. Beteiligte waren der Dozent und ein KI-gestütztes Werkzeug für die Umsetzung von Programmteilen.
Mit dem Dozenten war die frühe Klärung der Nachweisform der eine wirksame Vorgang: Alle Prüfungen werden vorgängig durchgeführt und protokolliert statt an der Präsentation vorgeführt. Das hat den Nachweisaufwand gegenüber der Planung erhöht und zugleich jeden Nachweis vom Gelingen eines einzelnen Termins gelöst.

9.3 Lessons learnt

Aus den festgehaltenen Entscheiden und Beobachtungen lassen sich sechs Lektionen herausheben. Alle sechs betreffen das Vorgehen und nicht die Technik und jede führt zu etwas, das in 9.4 wieder auftaucht.

1 — Planung wirkt nur mit Kontrolle und Puffer ist Teil der Planung

Ein Plan, der nach dem Erstellen abgelegt wird, ist eine Momentaufnahme. Seinen Nutzen entfaltet er erst, wenn er regelmässig gegen den tatsächlichen Stand gehalten wird. Dann zeigt er nicht nur, was hinterherhinkt, sondern auch, was deswegen als Nächstes blockiert.
Daraus folgt: Ein Projektplan muss laufend mit dem tatsächlichen Stand verglichen und bei Bedarf angepasst werden.

2 — Vor dem Bauen das Werkzeug an kleinen Beispielen lernen

Bildverarbeitung und Oberflächenwerkzeug waren beide neu. Der schnellste Weg war nicht, sie am eigenen System zu lernen, sondern an Beispielen von zwanzig Zeilen, die nichts konnten ausser dem einen Schritt, um den es ging. Ein Fehler ist dort sofort sichtbar.
Daraus folgt: Die Einarbeitung ist kein Vorspiel zur Arbeit, sondern ihr erster Arbeitsschritt.

3 — Unstrukturierte Fehlersuche ist der teuerste Zeitverlust

Bei der vertauschten Kamerazuordnung wurde dort gesucht, wo die falschen Zahlen auftauchten und nicht dort, wo sie entstanden. Das kostete Zeit, ohne dem Fehler näher zu kommen.
Was jedes Mal geholfen hat, ist eine Reihenfolge: erst die vorhandenen Daten auswerten, dann die Vermutung so formulieren, dass sie sich widerlegen lässt, dann messen und erst danach etwas ändern. Beim Berührungsfehler im Korrekturdialog sind auf diesem Weg drei Vermutungen widerlegt worden, bevor die vierte trug.
Daraus folgt: Vor der ersten Änderung am Programm steht die Auswertung dessen, was bereits aufgezeichnet ist.

4 — Ein Fehler, der sich nicht meldet, ist der teure

Eine vertauschte Kamerazuordnung erzeugt keine Warnung, sondern ausschliesslich falsche Zahlen. Ein Phantomwurf verschiebt den Rundenzähler, ohne dass es jemand sieht. Beim Stehenbleiben der Anlage

blieb der Verbindungspunkt grün, während keine Daten mehr flossen. Allen ist gemeinsam, dass sie von innen richtig aussehen.
Daraus folgt: Wo eine Verwechslung möglich ist, gehört eine automatische Prüfung in den Programmstart.

5 — Mit einem KI-gestützten Werkzeug muss ausführlich und genau gesprochen werden

Das Werkzeug sieht ausschliesslich, was auf dem Laptop liegt. Es sieht nicht den Aufbau, nicht die Kameras, nicht das Verhalten der Anlage im Raum und nicht, was beim Werfen tatsächlich geschieht. Fehlt diese Umgebung in der Beschreibung, wird sie nicht einfach weggelassen, sondern ergänzt. Und zwar aus einer Annahme. Die Folge sind richtig gezogene Schlüsse aus einer falschen Ausgangslage.
Ebenso wirkt Ungenauigkeit in der Vorgabe. Mehrfach enthielten eigene Aufträge einander widersprechende Punkte. Aufgefallen sind sie erst bei der Umsetzung.
Daraus folgt: Was ausserhalb des Laptops liegt, wird beschrieben und nicht vorausgesetzt. Und jede Vorgabe wird so genau wie möglich formuliert.

9.4 Ausblick

Die Anlage erfüllt ihre Erfolgskriterien und die Überlegungen für eine zweite Prototypenstufe haben bereits begonnen. Sie verfolgt kein neues Verfahren, sondern behebt die bekannten Schwächen des ersten Aufbaus.

Bereich	Vorgesehen
Aufbau	Neuer Rahmen in Aluminium statt der bisherigen Trägerplatte. Kompaktere und stabilere Gehäuse für Rechner. Vereinfachung (Licht, Netzteil)
Umgebung	Anbindung an ein Tablet/Handy
Programm	Höhere Trefferquote im Doppelring, Ausbau der Spielarten und Abschlussregeln und die übrigen in dieser Arbeit benannten Verbesserungen. Layoutüberarbeitung
Kosten	Reduktion durch Anpassungen an Aufbau

9.5 Fazit

Das Ziel der Diplomarbeit wurde erreicht. Viele Inhalte aus dem Bildungsgang konnten dabei nicht nur in einzelnen Übungen, sondern gemeinsam in einem vollständigen Produkt angewendet werden. Dazu gehören insbesondere Schaltungsentwurf, Energieversorgung und Messtechnik.
Die Arbeit war dadurch gleichzeitig anspruchsvoll und abwechslungsreich. Besonders hilfreich war das Pflichtenheft, da die klar definierten Anforderungen den Aufbau in überprüfbare Schritte unterteilten und so die Umsetzung übersichtlich machten.
Ein zentraler Teil der Arbeit war die Verbindung von Hardware und Software zu einem funktionierenden Gesamtsystem. Gerade dieses Zusammenspiel hat gezeigt, wie die verschiedenen Fachbereiche ineinandergreifen und gemeinsam zum fertigen DartVision-Prototyp führen.

10 Projektüberwachung

Die Projektüberwachung ist im Vorgehensmodell als eigene Phase geführt, weil sich der Zeitbedarf einzelner Arbeiten im Voraus nur schwer abschätzen liess. Sie stützte sich auf drei Mittel: den wöchentlichen Projektstatusbericht an den Diplomlehrer mit Gesamtbeurteilung, aktuellem Stand, nächsten Schritten und getroffenen Massnahmen, die beiden Vorzeigetermine vom 28.09. und 16.10.2026 und den laufenden IST/SOLL -Vergleich des Projektablaufplanes. Die Statusberichte und die Protokolle der Vorzeigetermine sind im Anhang abgelegt.

10.1 IST/SOLL Vergleich PAP

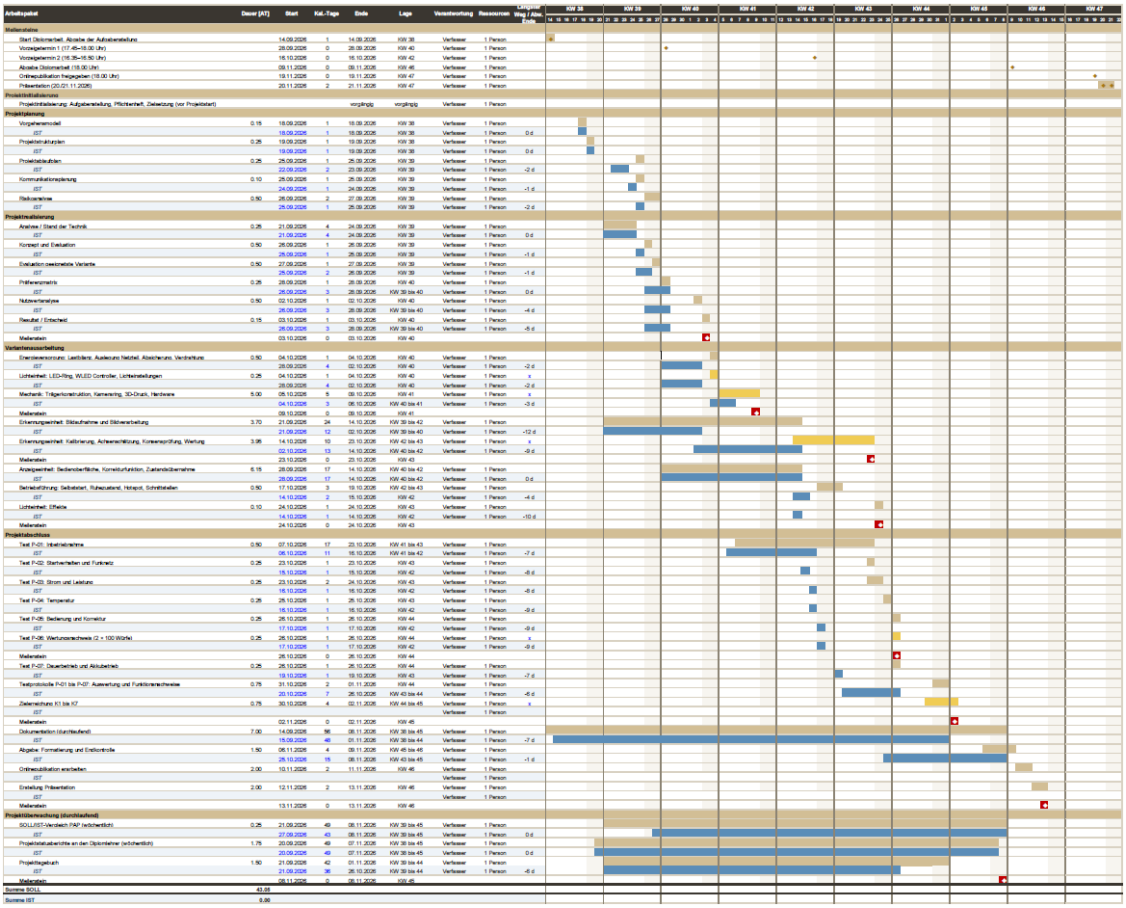


Abbildung 67: IST / SOLL - Vergleich

Der Vergleich stellt den geplanten Ablauf dem tatsächlichen gegenüber. Alle Termine wurden eingehalten, kein Meilenstein musste verschoben werden.

Vier Gründe tragen dieses Ergebnis.

1. Das Material wurde frühzeitig bestellt, sodass keine Lieferung zum Engpass wurde.
2. In die Planung war Puffer eingebaut, der die Rückschläge auffing, ohne dass aus einem Problem zugleich ein Terminproblem wurde.
3. Die Motivation blieb über die ganze Dauer hoch, weil an einem Produkt gearbeitet wurde, dessen Fortschritt nach jedem Schritt sichtbar war.
4. Der klare, vorab festgelegte Ablauf hat geholfen: Wer weiss, was als Nächstes an der Reihe ist, verliert keine Zeit mit der Frage.

11 Eigenständigkeitserklärung

Die Verfasserinnen und Verfasser bestätigen mit ihrer Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel erstellt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Unterschriften: Datum/Ort: 08.11.2026, 4806 Wikon

Timo Meier



12 KI-Nutzung

Für die Erstellung und Bearbeitung dieser Arbeit wurden die KI-Werkzeuge Claude und Claude Code unterstützend eingesetzt. Die folgende Übersicht nennt je Bereich, was das Werkzeug getan hat und was vom Verfasser vorgegeben und geprüft wurde.

Recherche

- Einsatz:
  Zusammenstellung von Übersichten zu Mikrocomputern, Bildverarbeitungswerkzeugen und Oberflächenwerkzeugen
- Vorgabe/Prüfung
  Fragestellung und Auswahlkriterien vorgegeben, Entscheid selbst getroffen, übernommene Angaben gegen die Herstellerquelle geprüft

Titelbild

- Einsatz:
  Entfernung des Hintergrundes
- Vorgabe/Prüfung
  Nur Aufbau darstellen und Hintergrund weiss

Blockschaltbilder

- Einsatz:
  Erstellung auf Grundlage des bereitgestellten Inhalts
- Vorgabe/Prüfung
  Inhalt, Aufbau und Beschriftung vorgegeben, Bild gegen den wirklichen Aufbau geprüft

Displaybilder

- Einsatz:
  Bearbeitung bestehender Bilder aufgrund starker Spiegelungen
- Vorgabe/Prüfung
  Spiegelung und Hintergrund entfernen

Programmcode Dokumentation

- Einsatz:
  Der in der Dokumentation abgebildete Quelltext wurde von der KI formatiert
- Vorgabe/Prüfung
  Quelltext stammt unverändert aus dem Programm. Keine inhaltliche Änderung

Programmcode Hauptprogramm

- Einsatz:
  Die Aufträge für das Hauptprogramm wurden blockweise an Claude Code übergeben
- Vorgabe/Prüfung
  Auftrag, Abgrenzung, Abnahmekriterien und Prüfung je Block

Programmcode Anzeige

- Einsatz:
  Unterstützung bei den aufwendigeren Teilen. Abschaltung und Neustart, Haltung der Wurfkacheln, Verbindung zum Hauptrechner
- Vorgabe/Prüfung
  Aufbau, Gestaltung und Bedienablauf selbst entworfen; jedes Ergebnis am Gerät geprüft

Prüfprotokolle

- Einsatz:
  Formatierung auf Grundlage vorgegebenen Inhalts
- Vorgabe/Prüfung
  Aufbau, Inhalt und Prüfungen vorgegeben. Messungen am Gerät selbst durchgeführt. Messwerte, Sollwerte und Bewertung vom Verfasser

Projektmanagementmethoden und -dokumente (PAP, PSP, Nutzwertanalyse, usw.)

- Einsatz:
  Formatierung und Hinterlegen der Formeln
- Vorgabe/Prüfung
  Inhalt, Kriterien, Gewichtungen und Bewertungen vollständig vom Verfasser

Befehlsübersicht

- Einsatz:
  Zusammenstellung und übersichtliche Dar-stellung der verwendeten Befehle
- Vorgabe/Prüfung
  Befehle stammen aus dem Betrieb der Anlage und sind am Gerät nachgeprüft

Fehlersuche

- Einsatz:
  Auswertung der Protokolldateien und Vorschläge zur Ursache
- Vorgabe/Prüfung
  Befund am Gerät erhoben, Vermutungen durch eigene Messungen bestätigt oder widerlegt, Entscheid über die Massnahme beim Verfasser

13 Verzeichnisse

13.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsblöcke und Schnittstellen 11
Abbildung 2: Von den Endergebnissen zu den Anforderungen 18
Abbildung 3: Von den Anforderungen zu den Arbeitspaketen 18
Abbildung 4: Projektstrukturplan 19
Abbildung 5: Projektablaufplan 20
Abbildung 6: Übersicht Hardware / Software 27
Abbildung 7: Phasenplan 39
Abbildung 8: Welche Phase welche Anforderung einlöst 40
Abbildung 9: Schaltungsübersicht vereinfacht dargestellt 44
Abbildung 10: Verdrahtungsübersicht 50
Abbildung 11: Schaltungsübersicht 51
Abbildung 12: Holzträger 52
Abbildung 13: Holzträger vor Lackierung 52
Abbildung 14: Haupthalterung 53
Abbildung 15: Abdeckung Haupthalterung 53
Abbildung 16: ESP32 Abdeckung 53
Abbildung 17: Füsse Display 53
Abbildung 18: Displayhalterung 53
Abbildung 19: Pi3 B+ Deckel 53
Abbildung 20: Frontansicht 54
Abbildung 21: Rückansicht offen 54
Abbildung 22: Rückansicht geschlossen 54
Abbildung 23: Ansicht schräg 54
Abbildung 24: Gesamtaufbau Endresultat 55
Abbildung 25: Hauptgehäuse 56
Abbildung 26: Aufbau ohne Schutz 56
Abbildung 27: Verdrahtungsübersicht 56
Abbildung 28: Verdrahtungsübersicht Hauptgehäuse 56
Abbildung 29: Verdrahtungsübersicht 56
Abbildung 30: Abdeckung Hauptgehäuse 56
Abbildung 31: Aufbau Träger&Schutz 57
Abbildung 32: C14 Kippschalter & WAGO-Klemmen 57
Abbildung 33: Anschlüsse LED-Ring 57
Abbildung 34: Kameramontage 57
Abbildung 35: Anschlüsse Netzteil 57
Abbildung 36: ESP32 57
Abbildung 37: provisorischer Aufbau 60
Abbildung 38: Kalibrierung - 7 Funktionsblöcke 63
Abbildung 39: Schachbrettmuster 64
Abbildung 40: Kalibrierpunkte 65
Abbildung 41: Abbildung berechnen 65
Abbildung 42: Feldumrisse konstruieren 66
Abbildung 43: Güte prüfen 66
Abbildung 44: Bildschirm - Kalibrierung 69
Abbildung 45: Erkennung grafisch 71
Abbildung 46: Erkennung & Wertung: Funktionsblöcke 71
Abbildung 47: Projizierte Linie 73
Abbildung 48: Arbeitsplatz 78
Abbildung 49: Die sieben Funktionsblöcke der Spiellogik und der Anzeige 82
Abbildung 50: VS-Programm 83
Abbildung 51: Startseite 84
Abbildung 52: Wahl der Spielerzahl 84
Abbildung 53: Die Spielart 84
Abbildung 54: Systemvorbereitung 85
Abbildung 55: Spielansicht - laufendes Spiel 87
Abbildung 56: Der Überwurf 87
Abbildung 57: Das Spielende 87
Abbildung 58: Die Rückfrage 88
Abbildung 59: Das Korrekturfeld 89
Abbildung 60: Die Korrektur am Beispiel 89

Abbildung 61: Die sieben Funktionsblöcke der Betriebsführung 95
Abbildung 62: Der Netzaufbau im Entwicklungs- und im Präsentationsbetrieb 97
Abbildung 63: Die vier Betriebszustände und ihre Übergänge 99
Abbildung 64: Lichtwechsel und Wertungssperre bei einem Überwurf 101
Abbildung 65: Zugriff über Termius 102
Abbildung 66: Prüfplan 106
Abbildung 67: IST / SOLL - Vergleich 117

13.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zielscheibe 12
Tabelle 2: Erkennung und Wertung 13
Tabelle 3: Spiellogik 13
Tabelle 4: Bedienung und Korrektur 13
Tabelle 5: Licht 14
Tabelle 6: Betrieb und Netzwerk 14
Tabelle 7: Komponentenauswahl 14
Tabelle 8: Zukauf und Eigenleistung 15
Tabelle 9: Eigenentwicklung und Eigenleistung im Rahmen der Arbeit 15
Tabelle 10: Eigenentwicklung Software (KI-unterstützt) 16
Tabelle 11: Termine und Meilensteine 16
Tabelle 12: Projektphasen 17
Tabelle 13: Kommunikationsplanung 21
Tabelle 14: Risikoanalyse Projektplanung 23
Tabelle 15: 16er Matrix vor Präventionsstrategie 24
Tabelle 16: Präventionsstrategie 24
Tabelle 17: 16er Matrix nach Präventionsstrategie 25
Tabelle 18: Kandidaten Akkumodul 28
Tabelle 19: Kriterien Beleuchtung 28
Tabelle 20: Kriterien Ansteuerung 29
Tabelle 21: Kandidaten Beleuchtung & Ansteuerung 29
Tabelle 22: Architektur der Energieversorgung 30
Tabelle 23: Kriterien Netzteil 30
Tabelle 24: Kandidaten Netzteil 30
Tabelle 25: Trägerkonstruktion 31
Tabelle 26: Programmiersprache 31
Tabelle 27: Bildverarbeitungsbibliothek 31
Tabelle 28: Oberflächenwerkzeug 32
Tabelle 29: Übertragungsweg Rechner 32
Tabelle 30: Betriebsart Netz 33
Tabelle 31: Übersicht betrachtete Varianten 34
Tabelle 32: Evaluation der geeignetsten Variante 34
Tabelle 33: Evaluation der geeignetsten Variante 35
Tabelle 34: Evaluation der geeignetsten Variante 35
Tabelle 35: Präferenzmatrix 36
Tabelle 36: Nutzwertanalyse 37
Tabelle 37: Gewählte Bauteile 38
Tabelle 38: Gewählte Softwarelösungen 38
Tabelle 39: Risikoanalyse Projektrealisation 41
Tabelle 40: 16er Matrix vor & nach Präventionsstrategie 42
Tabelle 41: Präventionsstrategie 42
Tabelle 42: Netzeingang und 230V 44
Tabelle 43: Prüfungen an 230-V-Seite 45
Tabelle 44: Auslegung 5V-Versorgung 45
Tabelle 45: Verbindung Netzteil zur Verteilung 45
Tabelle 46: Zuleitung zum Hauptrechner 46
Tabelle 47: Zuleitung zum Lichtcontroller 46
Tabelle 48: Einspeisung und Datenleitung des LED-Rings 47
Tabelle 49: Sollwerte der 5-V-Seite 47
Tabelle 50: Ladezuleitung der Anzeigeeinheit 47
Tabelle 51: Absicherung 48
Tabelle 52: Spannungsabfall auf den Abgängen 48
Tabelle 53: Übersicht der Leitungsabschnitte 49
Tabelle 54: 3D Druckteile 53

Tabelle 55: 3D Druck Fertigungsangaben 54
Tabelle 56: Aufbau Display 54
Tabelle 57: Stückliste komplett 58
Tabelle 58: Die beiden Quelltextarchive 61
Tabelle 59: Kalibrierung - Probleme 62
Tabelle 60: Kalibrierung - Funktionsblöcke 63
Tabelle 61: Kalibrierung - Kameras 64
Tabelle 62: Kalibrierung - Kalibrierpunkte 65
Tabelle 63: Kalibrierung - Kanten 67
Tabelle 64: Kalibrierung - Korrekturen 68
Tabelle 65: Kalibrierung - Ergebnisse 68
Tabelle 66: Kalibrierung - Ergebnisse 68
Tabelle 67: Erkennung und Wertung - Recherche 70
Tabelle 68: Erkennung und Wertung - Funktionsblöcke 72
Tabelle 69: Erkennung und Wertung - Aussehen Pfeil 73
Tabelle 70: Erkennung und Wertung - Bedingungen 74
Tabelle 71: Erkennung und Wertung - Felder 74
Tabelle 72: Erkennung und Wertung - Wertung 75
Tabelle 73: Erkennung und Wertung - Fehler 1 76
Tabelle 74: Erkennung und Wertung - Fehler 1 76
Tabelle 75: Erkennung und Wertung - Fehler 2 77
Tabelle 76: Erkennung und Wertung - Fehler 2 77
Tabelle 77: Erkennung und Wertung - Fehler 2 77
Tabelle 78: Erkennung und Wertung - Fehler 2 78
Tabelle 79: Erkennung und Wertung - Fehler 3 79
Tabelle 80: Erkennung und Wertung - Ergebnisse 79
Tabelle 81: Erkennung und Wertung - Ergebnisse 80
Tabelle 82: Erkennung und Wertung - Grenzen 80
Tabelle 83: Spiellogik & Anzeige - Recherche 81
Tabelle 84: Spiellogik & Anzeige - Funktionsblöcke 82
Tabelle 85: Spiellogik & Anzeige - Spielstart 85
Tabelle 86: Spiellogik & Anzeige - Korrektur 90
Tabelle 87: Spiellogik & Anzeige - Fehler 2 91
Tabelle 88: Spiellogik & Anzeige - Fehler 3 92
Tabelle 89: Spiellogik & Anzeige – Ergebnisse 92
Tabelle 90: Spiellogik & Anzeige - Grenzen 92
Tabelle 91: Ereignisfarben & Betriebsführung - Recherche 94
Tabelle 92: Ereignisfarben & Betriebsführung - Verbindung Rechner 94
Tabelle 93: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funktionsblöcke 95
Tabelle 94: Ereignisfarben & Betriebsführung - Selbststart 96
Tabelle 95: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funknetz 97
Tabelle 96: Ereignisfarben & Betriebsführung - Funknetz 97
Tabelle 97: Ereignisfarben & Betriebsführung - Gegenstellen 98
Tabelle 98: Ereignisfarben & Betriebsführung - Übertragung 98
Tabelle 99: Ereignisfarben & Betriebsführung - Farbzuordnung 100
Tabelle 100: Ereignisfarben & Betriebsführung - Lichtsteuerung 100
Tabelle 101: Ereignisfarben & Betriebsführung - Wertung 101
Tabelle 102: Ereignisfarben & Betriebsführung - Fehler 3 103
Tabelle 103: Ereignisfarben & Betriebsführung - Ergebnis 104
Tabelle 104: Ereignisfarben & Betriebsführung - Grenzen 104
Tabelle 105: Auswertung - Anforderungen 107
Tabelle 106: Auswertung - Inbetriebnahme 107
Tabelle 107: Auswertung - Startverhalten/Funknetz 107
Tabelle 108: Auswertung - Strom/Leistung 108
Tabelle 109: Auswertung - Temperatur 108
Tabelle 110: Auswertung - Bedienung/Korrektur 108
Tabelle 111: Auswertung - Wertungsnachweis 108
Tabelle 112: Auswertung - Dauerbetrieb 109
Tabelle 113: Auswertung - automatisierte Tests 109
Tabelle 114: Auswertung - Abdeckung Anforderungen 110
Tabelle 115: Auswertung - Kosten-Nutzen-Analyse 110

13.3 Literatur- und Quellenverzeichnis

13.3.1 Software, Bibliotheken und technische Dokumentationen

13.3.1.1 Bildverarbeitung und Berechnung (Raspberry Pi 5, DartVision_cv)

NumPy Developers (2026): *NumPy Documentation* [Online-Dokumentation]. Version 2.x. https://numpy.org/doc/stable/

OpenCV Team (2026): *OpenCV 4.x Documentation* [Online-Dokumentation]. Open Source Computer Vision Library. https://docs.opencv.org/4.x/

OpenCV Team (2026): *Camera Calibration (OpenCV-Python Tutorials)* [Online-Dokumentation]. https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html

OpenCV Team (2026): *How to Use Background Subtraction Methods* [Online-Dokumentation]. https://docs.opencv.org/4.x/d1/dc5/tutorial_background_subtraction.html

OpenCV Python Tutorial #1 – Introduction & Images
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#1
OpenCV Python Tutorial #2 – Image Fundamentals and Manipulation
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#2
OpenCV Python Tutorial #3 - Cameras and VideoCapture
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#3
OpenCV Python Tutorial #4 - Drawing (Lines, Images, Circles & Text)
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#4
OpenCV Python Tutorial #5 - Colors and Color Detection
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#5
OpenCV Python Tutorial #6 – Corner Detection
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#6
OpenCV Python Tutorial #7 – Template Matching (Object Detection)
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#7

13.3.1.2 Grafische Oberfläche (Raspberry Pi 3 B+, DartVision_display)

Fitzpatrick, M. (2026): *PyQt6 Tutorial – Create GUI applications with Python* [Online-Tutorial]. Python-GUIs. https://www.pythonguis.com/pyqt6-tutorial/

Riverbank Computing Limited (2026): *PyQt6 Reference Guide* [Online-Dokumentation]. Version 6.x. https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt6/

The Qt Company (2026): *Qt 6 Documentation* [Online-Dokumentation und Lernbeispiele]. Version 6.x. https://doc.qt.io/qt-6/ und https://try.qt.io/projects/outrun-ivi

PyQt5 Tutorial - Setup and a Basic GUI Application
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#1
PyQt5 Tutorial - Buttons and Events (Signals)
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#2
PyQt5 Tutorial - How to Use Qt Designer
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#3
PyQt5 Tutorial - MenuBar (Shortcuts, Status Bar and Triggers)
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#4
PyQt5 Tutorial - Images and QPixmap
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#5
PyQt5 Tutorial - QMessageBox and Popup Windows
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#6
PyQt5 Tutorial - ComboBoxes with Examples
⇒ https://www.youtube.com/watch?v=Tutorial#7

13.3.2 Betriebssystem, Treiber und Systemdienste

Aircoookie et al. (2026): *WLED – Control WS2812B and many more types of digital RGB LEDs* [Open-Source-Software, Dokumentation]. https://kno.wled.ge/

freedesktop.org (2026): *udev – Dynamic device management* [Online-Handbuch]. https://www.freedesktop.org/software/systemd/man/latest/udev.html

Linux Kernel Organization (2026): *Video for Linux API (V4L2)* [Online-Dokumentation]. Linux Kernel User-Space API. https://www.kernel.org/doc/html/latest/userspace-api/media/v4l/v4l2.html

PiSugar (2026): *PiSugar Power Manager* [Quellcode, GitHub-Repository]. https://github.com/PiSugar/PiSugar

Raspberry Pi Ltd (2026): *Raspberry Pi Documentation* [Online-Dokumentation]. Raspberry Pi OS, Hardware, Konfiguration. https://www.raspberrypi.com/documentation/

13.3.3 Datenblätter und Herstellerdokumentationen

GLEDOPTO (o. D.): *GL-C-016WL-D – ESP32 WLED-Controller 5–24 V DC mit UART und Mikrofon* [Produktseite, Händler Bastelgarage]. https://www.bastelgarage.ch/esp32-wled-controller-5-24v-dc-with-uart-and-mic-gl-c-016wl-d

Mean Well Enterprises (o. D.): *LRS-50 Series – 50 W Single Output Switching Power Supply* [Datenblatt]. https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=LRS-50

OmniVision Technologies (o. D.): *OV9732 – 1/4" Color 720p HD CMOS Image Sensor* [Produktseite]. https://www.ovt.com/products/ov9732/

Techstudio (o. D.): *OV9732-Kameramodul, 3er-Set USB-Kamera 1280 × 720* [Produktseite, Online-Shop]. https://techstudio.ch/products/ov9732-kameramodul-3er-set-usb-kamera-1280-x-720-webcam-hohe-bildklarheit-webkamera-mit-2-meter-kabe

PiSugar (o. D.): *PiSugar 3 Plus – Raspberry Pi UPS* [Produktseite]. https://www.pisugar.com/products/pisugar-3-plus-raspberry-pi-ups

Raspberry Pi Ltd (2023): *Raspberry Pi 5* [Produktseite / Product Brief]. https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/

Raspberry Pi Ltd (2018): *Raspberry Pi 3 Model B+* [Produktseite / Product Brief]. https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/

Raspberry Pi Ltd (2023): *Raspberry Pi Active Cooler (SC1148)* [Produktseite / Product Brief]. https://www.raspberrypi.com/products/active-cooler/

Raspberry Pi Ltd (2024): *Raspberry Pi Touch Display 2* [Produktseite / Product Brief]. https://www.raspberrypi.com/products/touch-display-2/

TRU Components (o. D.): *USB-C 3.1 Stecker mit offenem Kabelende* [Produktseite, Händler Digitec]. https://www.digitec.ch/en/s1/product/15779838

WAGO (o. D.): *Verbindungsklemme 221-415, 5-polig, 0,14–4 mm²* [Produktseite / Datenblatt]. https://www.wago.com/global/installation-terminal-blocks-and-connectors/compact-splicing-connector/p/221-415

Worldsemi (o. D.): *WS2812B – Intelligent control LED integrated light source* [Datenblatt]. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf

13.3.4 Normen und Regelwerke

World Darts Federation (WDF) (2024): *WDF Playing Rules* [Regelwerk]. Massangaben Dartscheibe und Abstände. https://www.dartswdf.com/rules/

13.3.5 Übernommene Konstruktionsdaten

OMMO (o. D.): OMMO Dartboard ring [3D-Druckdaten, zweite Fassung vom 07.12.2025]. MakerWorld, Lizenz «Standard Digital File License». https://makerworld.com/de/models/1124401-ommo-dart-board-ring

13.3.6 Vorgaben und Vorlagen zur Diplomarbeit

Alle Dokumente erhalten von TEKO Schweizerische Fachschule, Olten (interne Unterlagen, nicht öffentlich).

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *DA_2026_Beurteilungsraster Diplomarbeit* [Internes Dokument].

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *DA_2026_Datenplan* [Internes Dokument].

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *DA_2026_Name_Vorname_Vorlage Dokumentation (Möglicher Inhalt)* [Internes Dokument].

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *DA_2026_Name_Vorname_Vorlage Projektstatusbericht* [Internes Dokument].

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *Richtlinien Diplomarbeit_2025* [Internes Dokument].

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *Terminplan Herbst_2026* [Internes Dokument].

13.3.7 Unterrichtsunterlagen

Alle Unterlagen erhalten von TEKO Schweizerische Fachschule, Olten (interne Unterlagen, nicht öffentlich).

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *Embedded Systems 2026* [Kursplattform, Login erforderlich]. Modul Embedded Systems. https://embedded-systems.zietala.ch/login (abgerufen am 09.10.2026).

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2025): *0_Grundlagen Messtechnik 2025* [Foliensatz]. Modul Messtechnik.

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *TEKO_O_2025-2026_Mikrocomputertechnik_Veranstaltung_1-13* [Foliensätze]. Modul Mikrocomputertechnik und Sensorik.

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2022): *Foliensatz_Projektmanagement_2022* [Foliensatz]. Modul Projektmanagement.

TEKO Schweizerische Fachschule Olten (2026): *Slides Robotik 1–11* [Foliensätze]. Modul Robotik.

Abkürzung o. D.: ohne Datum

13.3.8 Eingesetzte KI-Werkzeuge

Anthropic (2026): *Claude* [KI-Assistent, Web-/Desktop-Anwendung]. Eingesetzt für: Siehe Kapitel KI-Nutzung. https://claude.ai/

Anthropic (2026): *Claude Code* [KI-gestütztes Entwicklungswerkzeug]. Eingesetzt für die blockweise Umsetzung von Programmteilen auf Hauptrechner und Anzeigeeinheit. https://claude.com/claude-code

14 Anhang

14.1 Projektstatusberichte

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 01 (20.09.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektinitialisierung / Projektplanung / Projektrealisierung	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇗	⇗	⇨	⇨	⇘

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung abgeschlossen
- Projektplanung
  - Erarbeitung Projektstrukturplanung
  - Erarbeitung Projektablaufplanung
- Projektrealisierung
  - Recherche / Aufbau Prototyp Version 1

Was läuft gut?
- Nach Startnervosität im Projekt angekommen
- Benötigtes Material und Werkzeuge vorhanden

Was läuft nicht gut?
- Ressourcen in erster Woche begrenzt, da letzte Schulwoche (Abgabe zwei Projekte und Präsentationen)

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Abschluss Projektplanung (Fokus Risikoanalyse)
- Projektrealisierung – Analyse Stand Technik und Konzept/Evaluation fertigstellen und festhalten. Erste Software Versuche Hauptprogramm und Display.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 02 (27.09.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektinitialisierung / Projektplanung / Projektrealisierung	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇗	⇗	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: Pflichtenheft und Qualifikationsprofil (Abklärung offen). Rest abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: aktuelle Phase nach Plan

Was läuft gut?
- Prototypenaufbau für erste Bildauswertung
- Dokumentation nebenbei pflegen

Was läuft nicht gut?
- keine Punkte

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Präferenzmatrix, Nutzwertanalyse und Resultat/Entscheid Variante
- Weiterarbeit Erkennungseinheit und Start Anzeigeeinheit
- Offene Fragen für Vorzeigetermin 1 vorbereitet

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 03 (04.10.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektrealisierung / Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇨	⇗	⇨	⇨	⇗

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: Ausarbeitung Variante gemäss PAP

Was läuft gut?
- Ferien. Unterbruchfreies arbeiten
- Anzeigeeinheit

Was läuft nicht (ganz so) gut?
- Fehlersuche Erkennungseinheit zum Teil aufwändig

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Weiterarbeit / Testen - Erkennungseinheit und Anzeigeeinheit
- Aufbau mechanisch/elektrisch
- Erstellung Testprotokolle

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 04 (11.10.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektrealisierung / Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇨	⇗	⇨	⇨	⇗

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: Erkennungs- und Anzeigeeinheit in Bearbeitung

Was läuft gut?
- Ferien. Unterbruchfreies arbeiten
- Mechanischer Aufbau schneller als geplant

Was läuft nicht (ganz so) gut?
- Fehlersuche weiterhin aufwändig

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Abschluss Erkennungs- und Anzeigeeinheit
- Betriebsführung und Testphase
- Dokumentation weiterführen

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 05 (18.10.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektrealisierung / Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇗	⇗	⇗	⇨	⇨

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: Erkennungseinheit abgeschlossen
  - Anzeigeeinheit abgeschlossen
  - Betriebsführung abgeschlossen
  - Testphase in Bearbeitung

Was läuft gut?
- Testphase bisher erfolgreich

Was läuft nicht gut?
- N.A

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Testphase (8 Testprotokolle abarbeiten und auswerten)
- Dokumentation weiterführen

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 06 (25.10.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektrealisierung / Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇗	⇗	⇗	⇨	⇨

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: abgeschlossen
- Projektabschluss: in Bearbeitung
- Projektüberwachung: in Bearbeitung

Was läuft gut?
- Testphase erfolgreich abgeschlossen

Was läuft nicht gut?
- N.A

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Dokumentation abschliessen
- Präsentation vorbereiten

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 07 (01.11.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇗	⇗	⇗	⇧	⇨

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: abgeschlossen
- Projektabschluss: abgeschlossen
- Projektüberwachung: abgeschlossen

Was läuft gut?
- Dokumentation abgeschlossen

Was läuft nicht gut?
- N.A

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Abgabe Dokumentation
- Präsentation und Onlinepublikation fertigstellen

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: DartVision (Diplomarbeit Dipl. Elektrotechniker HF) **Statusbericht: 08 (08.11.2026)**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Timo Meier	Projektabschluss	• Diplomlehrer (Thomas Belger)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇨	⇧	⇨	⇧	⇨

Aktueller Projektstand
- Projektinitialisierung: abgeschlossen
- Projektplanung: abgeschlossen
- Projektrealisierung: abgeschlossen
- Projektabschluss: abgeschlossen
- Projektüberwachung: abgeschlossen

Was läuft gut?
- Dokumentation abgeschlossen

Was läuft nicht gut?
- N.A

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen
- Abgabe Dokumentation
- Präsentation und Onlinepublikation fertigstellen

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

14.2 Meetingprotokolle

14.2.1 Meetingprotokoll Vorzeigetermin 01

Projekt	DartVision	**Datum**	Montag, 28.09.2026
Zeit	17.45 – 18.00 Uhr	**Ort / Kanal**	Online via TEAMS
Teilnehmende	Timo Meier (Diplomand) Thomas Bouchard (Diplomlehrer)	**Protokoll**	Timo Meier
Nächster Termin	Freitag, 16.10.2026	**Zeit / Kanal**	16.35 – 16.50 Uhr · TEAMS

1 Traktanden und Zeitplan

Nr.	Besprechungspunkt	Wer	Dauer
1	Ziele mit konkreten Endergebnissen und Erfolgskriterien	Diplomand	4'
2	Projektstruktur- sowie Projektablaufplanung inkl. Meilensteine	Diplomand	4'
3	Aufzeigen allfälliger aufgetretener Probleme (technische, logistische, theoretische etc.) mit Lösungsvorschlägen	Diplomand	4'
4	Fragen und Verschiedenes	Diplomand und Diplomlehrer	3'
		Total	**15'**

2 Vorgelegte Inhalte – Entscheid Diplomlehrer

Vorgelegter Inhalt	Entscheid	Begründung (bei «nicht angenommen»)
Ziele mit Endergebnissen und Erfolgskriterien	angenommen	
Projektstrukturplan (PSP)	angenommen	
Projektablaufplan (PAP) inkl. Meilensteine	angenommen	Meilensteine aufnehmen. Projektinitialisierung darf bei PAP fehlen, da bereits vorhanden.
Risikoanalyse und Präventionsstrategie		Nicht gezeigt/beurteilt.

3 Aufgetretene Probleme und Lösungsvorschläge

Problem (technisch, logistisch ...)	Lösungsvorschlag	Rückmeldung Diplomlehrer
N.A		
N.A		
N.A		

4 Fragen und Verschiedenes

Frage	Entscheid	Antwort / Bemerkung
1. Kommt das Pflichtenheft in voller Länge in die Dokumentation?	ja	
2. Qualifikationsprofil: 1:1 einfügen?	ja	
3. Abweichung Pflichtenheft – Vorführung zu Testprotokoll wechseln. Angenommen?	angenommen	
4. Datenblätter: alle 1:1 in den Anhang? (zum Teil 8 Seiten lang)	ja	Jedoch nur als Web-Links.
5. Weitere Fragen:		

5 Beschlüsse und Pendenzen

Beschluss / Pendenz	Wer	Termin
N.A		
N.A		

Protokoll erstellt: Timo Meier

14.2.2 Meetingprotokoll Vorzeigetermin 02

Projekt	DartVision	**Datum**	Freitag, 16.10.2026
Zeit	16.35 – 16.50 Uhr	**Ort / Kanal**	Online via TEAMS
Teilnehmende	Timo Meier (Diplomand) Thomas Bouchard (Diplomlehrer)	**Protokoll**	Timo Meier
Nächster Termin	Montag, 09.11.2026	**Zeit / Kanal**	Abgabe bis 18.00 Uhr

1 Traktanden und Zeitplan

Nr.	Besprechungspunkt	Wer	Dauer
1	Standortbestimmung in Bezug auf die genehmigten Ziele inkl. allfälliger Zielanpassungen mit Begründung	Diplomand	5'
2	Aufbau und Struktur der Dokumentation	Diplomand	5'
3	Fragen und Verschiedenes inkl. Abgabe des spezifischen Beurteilungsformulars für den Fachbetreuer	Diplomand	5'
		Total	**15'**

2 Vorgelegte Inhalte – Entscheid Diplomlehrer

Vorgelegter Inhalt	Entscheid	Begründung (bei «nicht angenommen»)
Standortbestimmung zu den genehmigten Zielen	angenommen	
Zielanpassungen mit Begründung (falls vorhanden)		nicht vorhanden
Aufbau und Struktur der Dokumentation (Inhaltsverzeichnis)	angenommen	Inhaltsverzeichnis und KI-Kapitel aufgezeigt.

3 Standortbestimmung Ziele (Erfolgskriterien K1 bis K7)

Ziel	Erfolgskriterium / Kurzbeschrieb	Stand	Bemerkung / Zielanpassung
K1	Hardwareprototyp aufgebaut	erreicht	
K2	Treffergenauigkeit > 80%	in Arbeit	Abschliessende Tests
K3	Spieleranzahl und Spielvarianten	erreicht	
K4	Menü und Dartkorrektur	erreicht	
K5	Spielereignisse	in Arbeit	Abschliessende Tests
K6	Autarker Betrieb	in Arbeit	Abschliessende Tests
K7	Dokumentation	in Arbeit	

4 Fragen und Verschiedenes

Frage	Entscheid	Antwort / Bemerkung
1. Frage: KI als Kapitel ausreichend oder in jedem Abschnitt hinzufügen?	ja	
2. Frage: Doku mehr auf Ablauf als zu technisch. In Ordnung?	ja	
3. Frage: Sollen mehr Bilder rein?	nein	Nur die, die nötig sind.
4. Frage: Kein Link zum DAP erhalten. Sollte ich bereits?		Kommt von TEKO Luzern. Wahrscheinlich erst nach Abgabetermin.

5 Beschlüsse und Pendenzen

Beschluss / Pendenz	Wer	Termin

Protokoll erstellt: Timo Meier

14.3 Lastberechnung und Auslegung des Netzteils

Dieses Dokument beinhaltet die Rechnung, mit der vor der Beschaffung bestimmt wurde, wie stark das Netzteil sein muss. Es geht in der Reihenfolge vor, in der die Auslegung entstanden ist. Zuerst die einzelnen Verbraucher, dann ihre Summe in zwei Betriebspunkten, daraus die geforderte Grösse des Geräts und erst zuletzt die Wahl und ihre Prüfung.
Zwei Anforderungen verlangen diese Rechnung.

Anforderung	Inhalt
A20	Energieversorgung aus einem zentralen Netzteil mit abgesicherter Verteilung und einem einzigen Netzanschluss; Dimensionierung anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher, mit Reserve
A24	Das Netzteil ist auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve ausgelegt; die Auslegung wird rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen

Alle Verbraucher liegen auf einer einzigen Spannungsebene von 5 V. Diese Vereinfachung ist in der Konzeptphase entschieden worden und ist die Voraussetzung dafür, dass eine einzige Bilanz genügt.

14.3.1 Eingangswerte

Jeder Eingangswert führt mit, woher er stammt. Zwei der drei Summanden der späteren Höchstlast sind Obergrenzen und keine Betriebswerte. Ohne diese Kennzeichnung liesse sich das Ergebnis nicht richtig lesen.

Kürzel	Bedeutung
B	belegt — Herstellerdatenblatt oder Herstelleretikett
M	gemessen — datiertes Protokoll
A	Annahme — nicht belegt; die Richtung ihrer Wirkung ist angegeben

Nr.	Grösse	Wert	Art	Quelle
1	LED-Streifen, Leistung je Rolle	45 W auf 5 m	B	Herstelleretikett
2	LED-Streifen, Bestückungsdichte	30 LED/m	B	Etikett und Produktseite
3	Zahl der verbauten Leuchtdioden	68	B	Bauteilaufnahme am Aufbau
4	Helligkeitsbegrenzer im Lichtcontroller	3400 mA	B	Einstellung am Controller, abgelesen
5	Lichtring, Durchschnitt im Spielbetrieb	≈ 2,5 A	A	Schätzung der Auslegung, Richtung offen
6	Hauptrechner, Spitze	5,0 A	B	Herstellerangabe
7	Hauptrechner, Durchschnitt unter Last	2,5 bis 3,0 A	A	Schätzung der Auslegung, Richtung offen
8	Kameramodule, drei zusammen	0,75 A	A	nicht belegt, bewusst zu hoch angesetzt
9	Lichtcontroller, Eigenaufnahme	—	—	nicht abgedeckt, keine Angabe verfügbar
10	Netzteil, Nennstrom	10 A	B	Datenblatt
11	Netzteil, Nennleistung	50 W	B	Datenblatt
12	Netzteil, Wirkungsgrad	0,83	B	Datenblatt
13	Akkumodul der Anzeigeeinheit	3,0 A	B	Herstellerangabe, Obergrenze, Eingang

14.3.2 Der Lichtring

Der Lichtring ist der einzige Verbraucher, dessen Höchstwert sich vollständig aus belegten Angaben rechnen lässt. Der Weg führt vom Etikett der Rolle über den Strom je Leuchtdiode zum Strom des verbauten Rings.

```
Schritt 1   Strom der ganzen Rolle
            I_Rolle = P_Rolle / U
                    = 45 W / 5 V
                    = 9,00 A

Schritt 2   Zahl der Leuchtdioden auf der Rolle
            n_Rolle = l_Rolle * Dichte
                    = 5 m * 30 LED/m
                    = 150 LED

Schritt 3   Strom je Leuchtdiode bei Vollweiss
            I_LED   = I_Rolle / n_Rolle
                    = 9,00 A / 150
                    = 0,0600 A = 60,0 mA

Schritt 4   Strom des verbauten Rings
            I_Ring  = n_verbaut * I_LED
                    = 68 * 0,060 A
                    = 4,08 A

Schritt 5   Leistung des Rings
            P_Ring  = I_Ring * U
                    = 4,08 A * 5 V
                    = 20,4 W

Kontrolle   Leistung je Meter
            P_je_m  = 45 W / 5 m = 9,0 W/m
            Gegenprobe: 30 LED/m * 0,3 W/LED = 9,0 W/m
```

Der Lichtcontroller trägt einen Helligkeitsbegrenzer, der auf 3400 mA eingestellt ist. Er liegt unter dem gerechneten Höchstwert und greift damit ein:

```
            I_Begrenzer = 3,40 A
            Verhältnis  = 3,40 A / 4,08 A = 0,8333
                        -> rund 83 Prozent der ungebremsten Helligkeit
            Differenz   = 4,08 A - 3,40 A = 0,68 A
```

14.3.3 Die Lastbilanz

Gerechnet wird in zwei Betriebspunkten. Der Durchschnittsbetrieb beschreibt, was die Anlage im Spiel tatsächlich zieht. Das rechnerische Maximum beschreibt, was sie ziehen könnte, wenn jeder Verbraucher gleichzeitig seinen Höchstwert erreicht.

Verbraucher	Maximum	Durchschnitt	Grundlage
Lichtring, 68 Leuchtdioden	4,08 A	≈ 2,5 A	aus der Leistungsangabe der Rolle gerechnet
Lichtring mit Begrenzer	3,40 A	—	eingestellter Wert am Controller
Hauptrechner	5,00 A	≈ 2,75 A	Herstellerangabe zur Auslegung der Versorgung
Kameramodule, drei zusammen	0,75 A	≈ 0,50 A	Annahme, wirkt auf die sichere Seite
Lichtcontroller	—	—	nicht abgedeckt
Summe ohne Begrenzer	9,83 A	—	
Summe mit Begrenzer	9,15 A	5,75 A	

```
Rechnerisches Maximum ohne Begrenzer
   4,08 A + 5,00 A + 0,75 A = 9,83 A

Rechnerisches Maximum mit Begrenzer
   3,40 A + 5,00 A + 0,75 A = 9,15 A

Durchschnittsbetrieb
   2,50 A + 2,75 A + 0,50 A = 5,75 A
```

Das rechnerische Maximum ist eine obere Schranke. Zwei seiner drei Summanden sind Obergrenzen: Die 5,0 A des Hauptrechners sind die Angabe zur Auslegung der Versorgung und nicht seine Aufnahme unter Last. Und die 0,75 A der Kameramodule sind eine bewusst hoch gegriffene Annahme.

14.3.4 Wie stark das Netzteil sein muss

Aus der Bilanz folgt unmittelbar die Anforderung an das Gerät. Massgebend ist das rechnerische Maximum mit Begrenzer.

Betriebspunkt	Gesamtstrom	Gefordert bei 5 V
Durchschnittsbetrieb	5,75 A	28,75 W
Rechnerisches Maximum mit Begrenzer	9,15 A	45,75 W
Rechnerisches Maximum ohne Begrenzer	9,83 A	49,15 W

Ein Netzteil muss den obersten dieser Werte dauerhaft liefern können und darüber hinaus Reserve tragen. Die folgende Gegenüberstellung zeigt, was ein Gerät mit 10 A Nennstrom in jedem der drei Fälle übriglässt.

```
Durchschnittsbetrieb
   Auslastung = 5,75 A / 10 A = 0,575  ->  58 %
   Reserve    = 10,00 - 5,75  = 4,25 A ->  21,3 W

Rechnerisches Maximum mit Begrenzer
   Auslastung = 9,15 A / 10 A = 0,915  ->  92 %
   Reserve    = 10,00 - 9,15  = 0,85 A ->   4,3 W

Rechnerisches Maximum ohne Begrenzer
   Auslastung = 9,83 A / 10 A = 0,983  ->  98 %
   Reserve    = 10,00 - 9,83  = 0,17 A ->   0,9 W
```

Die letzte Zeile ist der Grund, weshalb der Begrenzer gesetzt ist. Ohne ihn bliebe im Grenzfall weniger als ein Fünftel Ampere Reserve und damit wäre die Auslegung von der Annahme abhängig, dass nie alle Verbraucher zugleich ihren Höchstwert ziehen.
Daraus die Anforderung an das Gerät: mindestens 9,15 A bei 5 V, also rund 46 W Ausgangsleistung, mit tragfähiger Reserve darüber.

14.3.5 Die Netzseite

Aus dem Ausgangsstrom folgt über den Wirkungsgrad die aufgenommene Leistung und daraus der Eingangsstrom. Er bestimmt die Vorsicherung.

```
Wirkungsgrad  eta = 0,83

Durchschnittsbetrieb
   P_aus = 5,75 A * 5 V        = 28,75 W
   P_ein = 28,75 W / 0,83      = 34,6 W

Rechnerisches Maximum mit Begrenzer
   P_aus = 9,15 A * 5 V        = 45,75 W
   P_ein = 45,75 W / 0,83      = 55,1 W

Eingangsstrom im Grenzfall
   I_ein = 55,1 W / 230 V      = 0,240 A

Ausnutzung der Vorsicherung T 2 A
   0,241 A / 2,0 A             = 0,121  ->  12 %
```

Die Vorsicherung ist damit zu 12 Prozent ausgenutzt. Eine auf den Betriebsstrom bemessene Sicherung läge bei etwa 0,25 A und würde bei jedem Einschalten auslösen, weil ein Schaltnetzteil beim Laden seiner Eingangskondensatoren kurzzeitig ein Vielfaches des Betriebsstroms zieht.

14.3.6 Das gewählte Netzteil

Gewählt ist ein Gerät mit 5 V, 10 A und 50 W Nennleistung. Die Auswahl zwischen einem Netzteil und zweien sowie zwischen Baureihe und Baugrösse ist Gegenstand der Evaluation. Hier steht nur, ob die Wahl die Rechnung trägt.

Prüfung	Ergebnis
Deckt den Durchschnittsbetrieb	5,75 A von 10 A, Auslastung 58 Prozent, Reserve 4,25 A
Deckt das rechnerische Maximum mit Begrenzer	9,15 A von 10 A, Auslastung 92 Prozent, Reserve 0,85 A
Deckt die Ausgangsleistung	45,75 W von 50 W
Vorsicherung	zu 12 Prozent ausgenutzt

Die Ausgangsspannung ist auf 5,15 V eingestellt und nicht auf 5,00 V. Das ist keine Reserve für alle Fälle, sondern die gerechnete Kompensation einer bekannten Grösse: Der Sollwert am Hauptrechner liegt bei mindestens 4,9 V unter Last und der berechnete Abfall über die Zuleitung beträgt rund 0,1 V.
Der Entscheid für das kleinere Gerät kauft rechnerische Reserve gegen kleineren Bauraum. Er ist deshalb mit einem im Voraus festgelegten Ausweg versehen: Liegt der gemessene Gesamtstrom dauerhaft über rund 9 A, wird auf das nächstgrössere Gerät derselben Baureihe gewechselt.

14.3.7 Die Mitversorgung der Anzeigeeinheit

Erwogen wurde, die Anzeigeeinheit aus demselben Netzteil zu speisen. Versorgt würde dabei nicht der Rechner unmittelbar, sondern sein Akkumodul, dessen Eingang Betrieb und Ladung zusammen deckt.

```
Zusätzlicher Bedarf, Obergrenze = 3,00 A

Grenzfall
   ohne Anzeigeeinheit    9,15 A von 10 A    Reserve     +0,85 A
   mit Anzeigeeinheit    12,15 A von 10 A    Fehlbetrag  -2,15 A
   Auslastung            12,15 / 10 = 122 %

Durchschnittsbetrieb
   ohne Anzeigeeinheit    5,75 A von 10 A    Reserve     +4,25 A
   mit Anzeigeeinheit     8,75 A von 10 A    Reserve     +1,25 A
   Auslastung             8,75 / 10 =  88 %
```

Entschieden wird die Frage im Grenzfall und nicht im Durchschnittsbetrieb: Der Grenzfall ist bereits ohne die Anzeigeeinheit zu 92 Prozent ausgeschöpft und jede Zusatzlast über 0,85 A überschreitet den Nennstrom.
Aus diesem Grund wird der Betrieb über das Netzteil anhand praktischer Tests überprüft. Für erste Display-Tests kann ein zusätzliches, vorhandenes Standard-Netzteil mit 2A Ausgangsstrom verwendet werden.

Zusammenstellung der Ergebnisse

Grösse	Wert	Art
Strom je Leuchtdiode	60,0 mA	B, gerechnet
Lichtring, Vollweiss ungebremst	4,08 A entsprechend 20,4 W	B, gerechnet
Lichtring mit Begrenzer	3,40 A	B
Wirkung des Begrenzers	83 Prozent der Helligkeit	gerechnet
Summe, Durchschnittsbetrieb	5,75 A	teils A
Summe, Grenzfall mit Begrenzer	9,15 A	teils A
Auslastung des Netzteils	58 Prozent und 92 Prozent	gerechnet
Reserve	4,25 A und 0,85 A	gerechnet
Eingangsleistung	34,6 W und 55,1 W	gerechnet
Eingangsstrom im Grenzfall	0,241 A	gerechnet
Ausnutzung der Vorsicherung	12 Prozent	gerechnet
Mitversorgung der Anzeigeeinheit, Grenzfall	Fehlbetrag 2,15 A	gerechnet

Nicht enthalten und nicht abgedeckt sind die Eigenaufnahme des Lichtcontrollers, die Leerlaufaufnahme des Netzteils und der tatsächliche Bedarf der Kameramodule.

14.4 Präferenzmatrix

Vorgehen:

- Jedes Kriterium wird paarweise gegen jedes andere gestellt (n · (n − 1) / 2 Vergleiche). Massgebend ist die Wichtigkeit für den Entscheid (3 bestimmend, 2 mitbestimmend, 1 nebensächlich), nicht dessen Ausgang.
- Eine Nummer (z. B. 1): dieses Kriterium wiegt schwerer und erhält den Punkt. Zwei Nummern (z. B. 1+2): Gleichstand, beide erhalten einen Punkt – ein Sieger wird nicht erfunden.
- Jedes Kriterium erhält einen Zuschlagspunkt, damit das letzte nicht auf 0,00 % fällt. Die Rangfolge ändert sich dadurch nicht.
- Gewichtung = Punkte ÷ Total × 100, auf zwei Stellen gerundet. Geht die Summe nicht auf 100,00 auf, wird die Differenz in 0,01-Schritten bei den grössten Gewichtungen ausgeglichen (betrifft Gegenstände 2 und 6).

14.4.1 Gegenstand 1 - Hauptrechner

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	5	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Drei Bildströme gleichzeitig		1+2	1	1	1	5	1	29.41	**29.41**
2	Treiber- und Softwareunterstützung			2	2	2	5	1	29.41	**29.41**
3	Reserve für Erweiterungen				3+4	3	3	3	17.65	**17.65**
4	Kosten					4	3	3	17.65	**17.65**
5	Rechenleistung						1	5	5.88	**5.88**
	Total						**17**		**100.00**	**100.00**

14.4.2 Gegenstand 2 – Anzeigerechner

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Anzeige- und Oberflächenunterstützung		1	1	1	4	1	30.77	**30.76**
2	Leistung für die Oberfläche			2+3	2+4	3	2	23.08	**23.08**
3	Aufwand und Risiko der Umsetzung				3+4	3	2	23.08	**23.08**
4	Kosten					3	2	23.08	**23.08**
	Total					**13**		**100.01**	**100.00**

14.4.3 Gegenstand 3 – Ansteuerung Beleuchtung

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Datenpegel am Streifen		1+2	1	1	4	1	33.33	**33.33**
2	Rückwirkung auf den Hauptrechner			2	2	4	1	33.33	**33.33**
3	Länge der Datenleitung				3+4	2	3	16.67	**16.67**
4	Ausstattung ab Werk					2	3	16.67	**16.67**
	Total					**12**		**100.00**	**100.00**

14.4.4 Gegenstand 4 – Netzteil

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Deckung der berechneten Last		1+2	1	1	4	1	33.33	**33.33**
2	Bauraum im vorhandenen Gehäuse			2	2	4	1	33.33	**33.33**
3	Auslastung im Höchstfall				3+4	2	3	16.67	**16.67**
4	Kosten					2	3	16.67	**16.67**
	Total					**12**		**100.00**	**100.00**

14.4.5 Gegenstand 5 – Programmiersprache

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Anbindung der Bildverarbeitungsbiblio-thek		1+2	1	1	4	1	33.33	**33.33**
2	Vorkenntnisse aus dem Unterricht			2	2	4	1	33.33	**33.33**
3	Entwicklungsaufwand				3+4	2	3	16.67	**16.67**
4	Eignung auf der gewählten Rechnerfa-milie					2	3	16.67	**16.67**
	Total					**12**		**100.00**	**100.00**

14.4.6 Gegenstand 6 - Bildverarbeitungsbibliotheke

Nr.	Kriterium	1	2	3	4	5	6	Punkte	Rang	Gew. gerundet	Gewichtung %
1	Echtzeitbetrieb an der Kamera		1+2	1	1	1	1	6	1	21.43	**21.42**
2	Kalibrierung und Abbildung			2	2	2	2	6	1	21.43	**21.42**
3	Konturverfahren und Morphologie				3+4	3+5	3+6	4	3	14.29	**14.29**
4	Abdeckung des ganzen Arbeitsablaufs					4+5	4+6	4	3	14.29	**14.29**
5	Verbreitung auf der Rechnerfamilie						5+6	4	3	14.29	**14.29**
6	Verbreitung in vergleichbaren Vorhaben							4	3	14.29	**14.29**
	Total							**28**		**100.02**	**100.00**

14.5 Nutzwertanalyse / Sensitivitätsanalyse

Vorgehen:

- Teilnutzen (TN) 1–3: 3 = ohne Einschränkung erfüllt, 2 = erfüllt mit benannter Einschränkung, 1 = nur bedingt erfüllt. Gewichteter Teilnutzen GTN = TN × Gewichtung; die Summe ist der Gesamtnutzen (max. 300,00) und ergibt die Platzierung.
- Kosten: Der günstigste Kandidat erhält 3, der zweitgünstigste 2, der drittgünstigste 1. Das Pflichtenheft kennt keine Kostengrenze; Bezug ist ein preiswertes Gesamtsystem. Kleine Unterschiede wurden berücksichtigt bei der Punktevergabe.
- Vor der Bewertung scheidet die Ausschlussprüfung Kandidaten aus, die harte Bedingungen nicht erfüllen.
- Sensitivität: Durchgang 1 (D1) tauscht die Gewichtung von Rang 1 und Rang 2, Durchgang 2 (D2) von Rang 1 und Rang 3; die TN bleiben unverändert. Bei gleichen Gewichtungen wird mit der nächsten verschiedenen Gewichtung getauscht
- Dominanz: Liegt ein Kandidat in jedem Kriterium vorn oder gleichauf, kann keine Gewichtung die Platzierung ändern (Gegenstände 3, 5 und 6).

14.5.1 Gegenstand 1 - Hauptrechner

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 3

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 5

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			Raspberry Pi 5		Raspberry Pi 4		Belegart
		Ausgang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	
1	Drei Bildströme gleichzeitig	29.41	17.65	5.88	3	88.23	2	58.82	Internetrecherche / Bestehende Aufbauten
2	Treiber- und Softwareunterstützung	29.41	29.41	29.41	3	88.23	3	88.23	Internetrecherche / Bestehende Aufbauten
3	Reserve für Erweiterungen	17.65	29.41	17.65	3	52.95	1	17.65	Internetrecherche
4	Kosten	17.65	17.65	17.65	1	17.65	3	52.95	Stückliste
5	Rechenleistung	5.88	5.88	29.41	3	17.64	2	11.76	Datenblattangabe
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**264.70**		**229.41**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**264.70**		**217.65**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**264.70**		**229.41**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**	

- Ausschlussprüfung: Orange Pi 5 Plus ausgeschieden – findet im vorgesehenen Gehäuse keinen Platz. Raspberry Pi 5 und Pi 4 erfüllen Baugrösse und Lieferbarkeit.
- Nutzwertanalyse: Der Raspberry Pi 5 liegt klar vorn; der Pi 4 punktet nur bei den Kosten.
- Sensitivität: Getauscht wird mit dem jeweils erstgenannten Kriterium. Der Favorit bleibt in beiden Durchgängen vorn; sein Gesamtnutzen ändert sich nicht, da er in vier von fünf Kriterien denselben TN trägt.

14.5.2 Gegenstand 2 - Anzeigerechner

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 2

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 4

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			Raspberry Pi 3 B+		Pi Zero 2 W		Arduino Mega		Belegart
		Ausgang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	TN	GTN	
1	Anzeige- und Oberflächenunterstützung	30.76	23.08	23.08	3	92.28	2	61.52	1	30.76	Internetrecherche
2	Leistung für die Oberfläche	23.08	30.76	23.08	3	69.24	2	46.16	1	23.08	Internetrecherche
3	Aufwand und Risiko der Umsetzung	23.08	23.08	23.08	3	69.24	2	46.16	1	23.08	Einschätzung des Verfassers
4	Kosten	23.08	23.08	30.76	2	46.16	1	23.08	3	69.24	Stückliste
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**276.92**		**176.92**		**146.16**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**276.92**		**176.92**		**146.16**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**269.24**		**169.24**		**161.52**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**		**3**	

• Ausschlussprüfung: Alle drei Kandidaten lieferbar und bewertet. Die Anzeigeschnittstelle ist bepunktet statt Ausschluss, da sie in der Quelle abgestuft erhoben wurde. Die Abnehmbarkeit ist kein Kriterium – alle erfüllen sie gleich.
• Nutzwertanalyse: Nur in der Kostenzeile liegt ein verworfener Kandidat vorn – die günstigste Bauform taugt am wenigsten. Mit 23,08 % holt sie den Arduino Mega auf 146,16 heran.
• Sensitivität: Keine Dominanz. D1 ändert nichts, da jeder Kandidat in beiden getauschten Kriterien denselben TN trägt. D2 ist aussagekräftig: Wiegen die Kosten am schwersten, rückt der Arduino Mega auf 161,52 vor – 7,72 Punkte hinter dem Zweiten, aber nicht vorbei. Der Favorit bleibt vorn.

14.5.3 Gegenstand 3 – Ansteuerung Beleuchtung

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 3

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 4

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			Funk-Controller mit Beleuchtungs-software		Kleine Funkpla-tine		Belegart
		Aus-gang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	
1	Kompatibilität des Datensignals mit dem LED-Streifen	33.33	16.67	16.67	3	99.99	1	33.33	Datenblattangabe
2	Rückwirkung auf den Hauptrechner	33.33	33.33	33.33	3	99.99	3	99.99	Internetrecherche
3	Länge der Datenleitung	16.67	33.33	16.67	3	50.01	3	50.01	Internetrecherche
4	Ausstattung ab Werk	16.67	16.67	33.33	3	50.01	1	16.67	Internetrecherche
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**300.00**		**200.00**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**300.00**		**233.32**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**300.00**		**200.00**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**	

• Ausschlussprüfung: Die unmittelbare Ansteuerung durch den Hauptrechner scheidet aus – die benötigte Programmbibliothek stützt sich auf die ältere Anschlussperipherie. Die Kostenzeile entfällt (keine Preisangaben).
• Nutzwertanalyse: Rückwirkung und Leitungslänge trennen die beiden Controllerlösungen nicht (sie unterscheiden nur den ausgeschiedenen Selbstbauweg). Der Abstand ruht auf Datenpegel und Ausstattung ab Werk.
• Sensitivität: Dominanz – der Funk-Controller liegt in allen vier Kriterien vorn oder gleichauf; keine Vertauschung kann die Platzierung ändern. Beide Durchgänge bestätigen das.

14.5.4 Gegenstand 4 Netzteil

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 3

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 4

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			LRS-50-5		LRS-100-5		Belegart
		Aus-gang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	
1	Deckung der berechneten Last	33.33	16.67	16.67	2	66.66	3	99.99	Berechnet und am Schluss gemessen
2	Bauraum im vorhandenen Gehäuse	33.33	33.33	33.33	3	99.99	1	33.33	Datenblattangabe
3	Auslastung im Höchstfall	16.67	33.33	16.67	2	33.34	3	50.01	Berechnet und am Schluss gemessen
4	Kosten	16.67	16.67	33.33	3	50.01	2	33.34	Stückliste
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**250.00**		**216.67**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**250.00**		**216.67**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**266.66**		**200.01**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**	

• Ausschlussprüfung: Beide Netzteile lieferbar und bewertet.
• Nutzwertanalyse: Einzige Bewertung, in der zwei von vier Kriterien (Lastdeckung, Auslastung) für den verworfenen LRS-100-5 sprechen; gewonnen wird über Bauraum und Kosten. Der Abstand von 33,33 entspricht genau dem Gewicht eines Dreiers – knapp, aber eindeutig.
• Sensitivität: Keine Dominanz; Rang 1 und 3 doppelt besetzt, getauscht wird mit dem erstgenannten. Der Favorit bleibt vorn und der Abstand wird nie kleiner – D2 vergrössert ihn, weil die Kosten für das gewählte Gerät sprechen.

14.5.5 Gegenstand 5 - Programmiersprache

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 3

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 4

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			Python		C++		C#		Belegart
		Aus-gang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	TN	GTN	
1	Anbindung der Bildverarbeitungsbibliothek	33.33	16.67	16.67	3	99.99	3	99.99	2	66.66	Internetrecherche
2	Vorkenntnisse aus dem Unterricht	33.33	33.33	33.33	3	99.99	2	66.66	2	66.66	Projektarbeit im Fach
3	Entwicklungsaufwand	16.67	33.33	16.67	3	50.01	1	16.67	2	33.34	Einschätzung des Verfassers
4	Eignung auf der gewählten Rechnerfamilie	16.67	16.67	33.33	3	50.01	3	50.01	1	16.67	Internetrecherche
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**300.00**		**233.33**		**183.33**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**300.00**		**200.01**		**183.33**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**300.00**		**233.33**		**166.67**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**		**3**	

- Ausschlussprüfung: Kein Ausschlusskriterium – alle Sprachen frei verfügbar und auf der Rechnerfamilie lauffähig; die Kostenzeile entfällt.
- Nutzwertanalyse: Python erreicht das Maximum von 300,00.
- Sensitivität: Dominanz – Python liegt in allen vier Kriterien vorn oder gleichauf. Nur die Werte der nachfolgenden Kandidaten verschieben sich; die Platzierung bleibt.

14.5.6 Gegenstand 6 - Bildverarbeitungsbibliothek

Tausch D1 (Rang 1 ↔ 2), Nr. 1 3

Tausch D2 (Rang 1 ↔ 3), Nr. 1 4

Nr.	Kriterium	Gewichtung %			OpenCV		scikit-image		SimpleCV		Belegart
		Aus-gang	D1	D2	TN	GTN	TN	GTN	TN	GTN	
1	Echtzeitbetrieb an der Kamera	21.42	14.29	14.29	3	64.26	1	21.42	2	42.84	Internetrecherche
2	Kalibrierung und Abbildung	21.42	21.42	21.42	3	64.26	2	42.84	1	21.42	Internetrecherche
3	Konturverfahren und Morphologie	14.29	21.42	14.29	3	42.87	2	28.58	1	14.29	Internetrecherche
4	Abdeckung des ganzen Arbeitsablaufs	14.29	14.29	21.42	3	42.87	2	28.58	1	14.29	Internetrecherche
5	Verbreitung auf der Rechnerfamilie	14.29	14.29	14.29	3	42.87	2	28.58	1	14.29	Internetrecherche
6	Verbreitung in vergleichbaren Vorhaben	14.29	14.29	14.29	3	42.87	2	28.58	1	14.29	Internetrecherche
	Gesamtnutzen Ausgang	**100.00**	**100.00**	**100.00**		**300.00**		**178.58**		**121.42**	
	Platzierung Ausgang					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 1					**300.00**		**185.71**		**114.29**	
	Platzierung Durchgang 1					**1**		**2**		**3**	
	Gesamtnutzen Durchgang 2					**300.00**		**185.71**		**114.29**	
	Platzierung Durchgang 2					**1**		**2**		**3**	

- Ausschlussprüfung: Kein Ausschlusskriterium – alle Bibliotheken frei verfügbar und in der gewählten Sprache ansprechbar; die Kostenzeile entfällt.
- Nutzwertanalyse: OpenCV erreicht das Maximum von 300,00.
- Sensitivität: Dominanz – OpenCV liegt in allen sechs Kriterien vorn oder gleichauf; die Platzierung ändert sich in keinem Durchgang.

14.5.7 Zusammenzug

Nr.	Gegenstand	Favorit (Ausgang)	Ausgangslage	Durchgang 1	Durchgang 2	Ergebnis
1	Hauptrechner	Raspberry Pi 5	264.70 : 229.41	264.70 : 217.65	264.70 : 229.41	**Favorit bleibt vorn**
2	Anzeigerechner	Raspberry Pi 3 B+	276.92 : 176.92 : 146.16	276.92 : 176.92 : 146.16	269.24 : 169.24 : 161.52	**Favorit bleibt vorn**
3	Ansteuerung Beleuchtung	Funk-Controller mit Beleuchtungs-software	300.00 : 200.00	300.00 : 233.32	300.00 : 200.00	**Favorit bleibt vorn**
4	Baugrösse Netzteil	LRS-50-5	250.00 : 216.67	250.00 : 216.67	266.66 : 200.01	**Favorit bleibt vorn**
5	Programmiersprache	Python	300.00 : 233.33 : 183.33	300.00 : 200.01 : 183.33	300.00 : 233.33 : 166.67	**Favorit bleibt vorn**
6	Bildverarbeitungsbibliothek	OpenCV	300.00 : 178.58 : 121.42	300.00 : 185.71 : 114.29	300.00 : 185.71 : 114.29	**Favorit bleibt vorn**

- In allen sechs Bewertungen steht der verbaute Kandidat an erster Stelle. Keine Punktzahl, Gewichtung oder Kriterium wurde nach dem Rechnen geändert.
- In keinem der zwölf Durchgänge wechselt der Favorit: Die gewählten Varianten behalten den höchsten Gesamtnutzen auch dann, wenn das wichtigste Kriterium sein Gewicht mit dem zweit- oder drittwichtigsten tauscht.
- Gegenstand 4a ist ohne Nutzwertanalyse (Voraussetzung des Vergleichs entfallen, siehe oben).

14.6 Testprotokolle

14.6.1 Gesamtübersicht

Bezeichnung	Seitenzahl
P-01 – Inbetriebnahme	146 bis 151
P-02 – Startverhalten	152 bis 156
P-03 – Strommessung	157 bis 160
P-04 – Temperaturmessung	161 bis 164
P-05 – Bedienung	165 bis 170
P-06 – Wertungsnachweis	171 bis 178
P-07 – Dauerbetrieb	179 bis 184
P-08 – Testbestand	185 bis 187

14.6.2 Prüfprotokoll P-01 — Inbetriebnahme in sieben Phasen

14.6.2.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-01 — Inbetriebnahme der Anlage nach Prüfplan
Gegenstand	Die gesamte Anlage, von der Netzseite bis zum Spielbetrieb: Netzeingang mit Schalter und Sicherung, Netzteil und Verteilung, Lichtcontroller mit LED-Ring, Erkennungseinheit mit drei Kameras, Anzeigeeinheit mit Akkumodul.
Zweck	Der Nachweis, dass die Anlage vollständig aufgebaut und betriebsbereit ist. Geprüft wird in sieben Phasen, von der stromlosen Prüfung bis zum Gesamttest mit allen Verbrauchern gleichzeitig.
Erfolgskriterium	K1 — «Der Hardware-Prototyp ist vollständig aufgebaut und betriebsbereit; alle drei Kameras, das Display und das LED-Band werden vom System angesteuert.»
Anforderungen	A20 — Energieversorgung aus einem zentralen Netzteil mit abgesicherter Verteilung. A23 — Der Mikrocomputer der Erkennungseinheit verarbeitet drei Kamerabilder gleichzeitig und stellt gleichzeitig einen Funkzugangspunkt bereit. A24 — Auslegung auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve.
Sollwerte	Je Phase vor der Messung festgelegt. Sie stehen in Abschnitt 6 neben ihrem Ergebnis.
Aufbau der Prüfung	Sieben Phasen. Eine Phase wurde erst gestartet, wenn die vorhergehende bestanden war.
Messzeitraum	06.10. bis 16.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

Die Phasenfolge ist der Kern dieser Prüfung. Sie stellt sicher, dass kein Verbraucher an eine Speisung kommt, die nicht vorher stromlos geprüft und danach im Leerlauf beobachtet worden ist.
Der Messzeitraum umfasst die sieben Phasen der Inbetriebnahme.

14.6.2.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
Benning MM 1-2	Multimeter mit Durchgangsprüfer. Phase 0, Phasen 1 und Phase 3	Widerstand, Gleichspannung, Durchgang	0,1 mV	10 A für höchstens 10 Minuten
Systembefehle beider Rechner	`vcgencmd get_throttled` und `vcgencmd measure_temp`, auf Erkennungs- und Anzeigeeinheit abgesetzt	Drosselungszustand, Chiptemperatur	0,1 °C	N.A

14.6.2.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, vollständig verdrahtet, Berührungsschutz montiert
Netzseite	ein Netzanschluss 230 V über Kaltgerätebuchse mit Kippschalter und Sicherung
Speisung	Mean Well LRS-50-5, senkrecht eingebaut, Ausgangsspannung am Poti auf 5,15 V eingestellt
Funknetz	Die Anlage spannt ein eigenes Funknetz auf. Lichtcontroller und Anzeigeeinheit sind darin eingebunden; ein Heimnetz wird nicht verwendet.
Anzeigeeinheit	mit dem verbauten Akkumodul..
Absicherung der Zuleitung	Die Anlage ist netzseitig abgesichert.

14.6.2.4 Prüfablauf

Phase	Handlung
0	Stromlose Prüfungen am fertig verdrahteten Aufbau: Schutzleiterdurchgang, Schaltweg des Kippschalters in beiden Stellungen, Kurzschlussprüfung zwischen L, N und PE sowie auf der 5-V-Seite, Polaritätsprüfung an beiden Verteilklemmen, am Pigtail und am Streifenende, Zugprobe an jedem Draht.
1	Erstes Einschalten mit getrennten Abgängen. Ausgangsspannung am Poti eingestellt, danach zwei bis drei Minuten im Leerlauf beobachtet.
2	Lichtcontroller eingerichtet: Bestückung, Farbordnung und Anzahl der Leuchtdioden gesetzt, Strombegrenzung mit automatischem Helligkeitsbegrenzer eingestellt, Gerät ins eigene Funknetz eingebunden.
3	LED-Ring geprüft: Farbordnung über Rot, Grün und Blau, danach Vollweiss bei aktivem Begrenzer mit Spannungsmessung an Streifenanfang und Streifenende, Sichtprüfung auf Gelbstich, zehn Minuten unter Volllast.
4	Erkennungseinheit in Betrieb genommen: Betriebssystem, Selbststart, Zustandskontrolle vor jeder Änderung. Die drei Kameras blieben über die ganze Phase angeschlossen.
5	Anzeigeeinheit in Betrieb genommen: Anzeige im Querformat, Bedienoberfläche, Selbststart im Vollbild, Funkstrecke in beide Richtungen geprüft.
6	Gesamttest mit allen Verbrauchern gleichzeitig: LED-Ring auf Vollweiss mit aktivem Begrenzer, drei Kameras in Betrieb, Erkennung aktiv. Spannungen und Systemzustände abgelesen.
7	Aufnahmen des Aufbaus und der Prüfmittel erstellt.

14.6.2.5 Aufbau

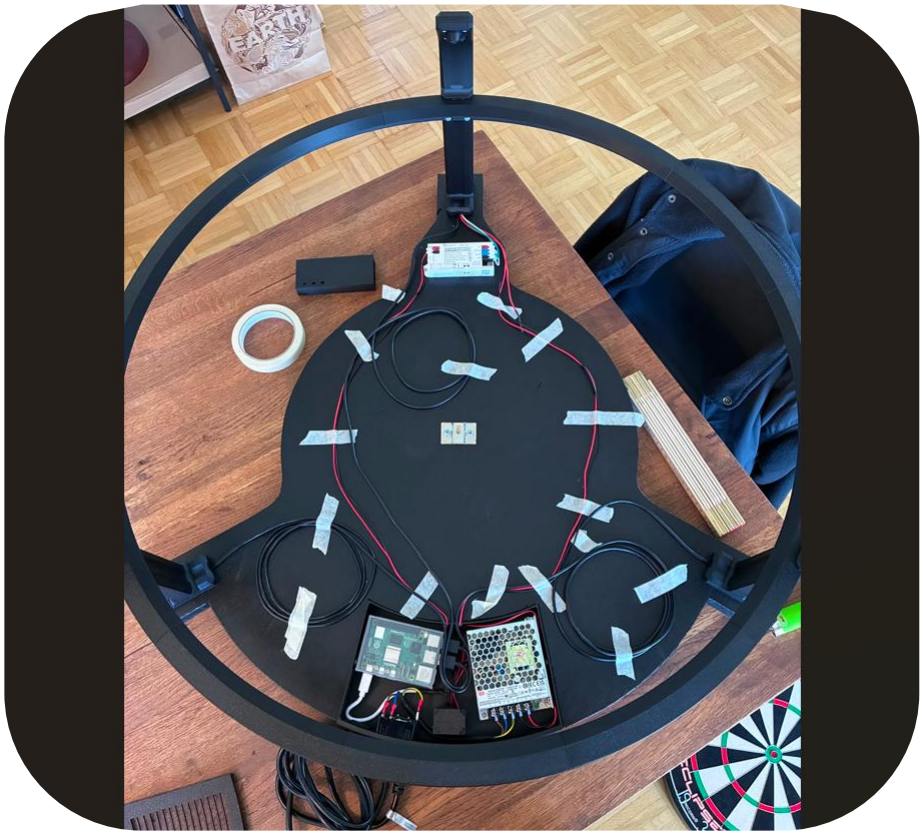


Abbildung 1: Verdrahtung

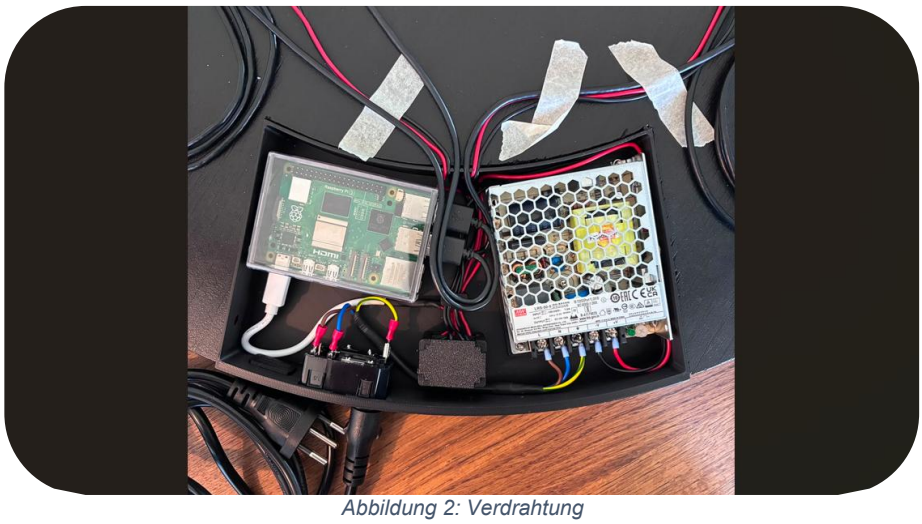


Abbildung 2: Verdrahtung

14.6.2.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Phase 0, stromlose Prüfungen, A20

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Schutzleiterdurchgang vom Netzeingang über die Netzteilklemme bis zum Metallgehäuse	unter 1 Ω	unter 1 Ω
2	Schaltweg des Kippschalters in beiden Stellungen	L- und N-Pfad schalten	bestanden
3	Kurzschlussprüfung zwischen L, N und PE	kein Kurzschluss	bestanden
4	Kurzschlussprüfung auf der 5-V-Seite	kein Kurzschluss	bestanden
5	Polarität an beiden Verteilklemmen, am Pigtail und am Streifenende	richtig	bestanden
6	Zugprobe an jedem Draht	hält	bestanden
7	Sicherung eingesetzt	ja	bestanden

Prüffolge 2 — Phasen 1 bis 5, Einrichtung und Einzelprüfungen, A20

Phase	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Ausgangsspannung am Poti, Abgänge getrennt	5,15 V	5,15 V
1	Beobachtung im Leerlauf	zwei bis drei Minuten ohne Auffälligkeit	bestanden
2	Bestückung des Lichtcontrollers	WS281x, GRB, 68 Leuchtdioden	eingerichtet
2	Strombegrenzung	3400 mA mit autom. Helligkeitsbegrenzer	eingerichtet
3	Farbordnung über Rot, Grün und Blau	richtig	bestanden
3	Spannung Streifenanfang, Vollweiss	mindestens 4,8 V	5,05 V
3	Spannung Streifenende, Vollweiss	mindestens 4,6 V	5,06 V
3	Farbe am Streifenende	kein Gelbstich	kein Gelbstich
3	Volllast über zehn Minuten	ohne Auffälligkeit	bestanden
4	Betriebssystem und Selbststart der Erkennungseinheit	läuft selbsttätig an	bestanden
4	Zustandskontrolle vor jeder Änderung, `get_throttled`	`0x0`	`0x0`
5	Anzeige im Querformat, Bedienoberfläche, Selbststart im Vollbild	läuft selbsttätig an	bestanden
5	Funkstrecke in beide Richtungen	steht	bestanden

Prüffolge 3 — Phase 6, Gesamttest mit allen Verbrauchern, A20 · A23 · A24

Die Spalte «Erhoben in» nennt, woher der Wert stammt; P-01 ist dieses Protokoll. Vier der zehn Sollwerte tragen ihr eigenes Protokoll; sie stehen hier mit ihrem Ergebnis und ohne ihre Herleitung.

Messgrösse	Sollwert	Messwert	Erhoben in
Gesamtstrom der 5-V-Schiene	höchstens 9 A, Ziel unter 8 A	5,98 A	P-03
Spannung an der Verteilung	5,15 V eingestellt	5,15 V	P-01
Spannung Streifenanfang	mindestens 4,8 V	5,05 V	P-01
Spannung Streifenende	mindestens 4,6 V	5,06 V	P-01
Unterspannungsmeldung beider Rechner	keine	keine	P-01
`vcgencmd get_throttled`	`0x0`	`0x0`	P-01
`vcgencmd measure_temp` unter Last	unter 80 °C	64,3 °C Erkennungseinheit, 54,8 °C Anzeigeeinheit	P-07
Gehäusetemperatur des Netzteils	deutlich unter 70 °C	36,5 °C	P-04
Funkstrecke zum Lichtcontroller	Befehle unter 1 s wirksam	kein Paketverlust, im Mittel 28 ms	P-02
Funkstrecke zur Anzeigeeinheit	stabil	kein Paketverlust, im Mittel 16 ms	P-02

Prüffolge 4 — Im Gesamttest zusätzlich erhoben

Messgrösse	Wert	Erhoben in
Bildrate, drei Kameras gleichzeitig über 436 Sekunden	je rund 30 Bilder je Sekunde	P-02

14.6.2.7 Auswertung

Gegen die Sollwerte

Grösse	Wert
Prüfungen der Phase 0	7 von 7 bestanden
Prüfungen der Phasen 1 bis 5	13 von 13 bestanden
Sollwerte des Gesamttests	10 von 10 eingehalten
Phasen, die zum Abbruch geführt haben	keine

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A20	Zentrales Netzteil mit abgesicherter Verteilung, ein Netzanschluss	bestanden
A23	Drei Kamerabilder gleichzeitig und zugleich ein Funkzugangspunkt	bestanden
A24	Netzteil auf den maximalen Gesamtstrom ausgelegt, rechnerisch und gemessen	bestanden

14.6.2.8 Ergebnis

Erfüllt. Die Inbetriebnahme ist in sieben Phasen durchgeführt und vollständig bestanden. Kein Sollwert ist verfehlt, keine Phase hat zum Abbruch geführt und der Gesamttest hat den gleichzeitigen Betrieb aller Verbraucher an einer Speisung gezeigt.

14.6.3 Prüfprotokoll P-02 — Startverhalten und Funknetz

14.6.3.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-02 — Kaltstart, eigenes Funknetz und Verbindungsverhalten
Gegenstand	Der Weg von der Netzspannung bis zur spielbereiten Anlage: der selbsttätige Start beider Rechner, das eigene Funknetz, in dem sich Anzeigeeinheit und Lichtcontroller anmelden, die Funkstrecken zwischen ihnen und der gleichzeitige Betrieb der drei Kameras.
Zweck	Der Nachweis, dass die Anlage ohne fremde Netzinfrastruktur und ohne Eingriff spielbereit wird — und dass sie es bleibt, wenn eine Verbindung abbricht.
Erfolgskriterium	K6 — «Das System läuft im eigenen Funknetz ohne fremde Netzwerkinfrastruktur und ist nach dem Herstellen der Netzspannung ohne weitere Eingriffe innerhalb von drei Minuten spielbereit.»
Anforderungen	A5 · A8 · A17 · A18 · A19 · A22
Sollwerte	Spielbereit innerhalb von drei Minuten · Funkstrecken stabil, Befehle unter 1 s wirksam · drei Kameras gleichzeitig mit rund 30 Bildern je Sekunde
Messtag	Freitag, 15.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

14.6.3.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
Stoppuhr	Zeit vom Herstellen der Netzspannung bis zur Spielbereitschaft, je Gerät	Zeit	1 s	Die Ablesung enthält die Reaktionszeit des Prüfenden.
Systemprotokoll beider Rechner	Paketverlust und Laufzeit der Funkstrecken, Bildrate der drei Kameras	Verlust in Prozent, Laufzeit in ms, Bilder je Sekunde	1 ms	Es misst, was die Anwendung sieht.
Mobiltelefon im Netz «DartVision»	Zugriff auf die Anlage bei abgeschaltetem Heimnetz	Verbindung steht oder nicht	—	—
SSH-Client Termius	Wartungszugang über das eigene Funknetz	Verbindung steht oder nicht	—	—
`check_camera_mapping.py`	Prüfung der Kamerazuordnung, wertet für alle drei Kanäle gleichzeitig ein Livebild aus	Zuordnung richtig oder nicht	—	—

14.6.3.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme ist in P-01 festgehalten
Funknetz	Die Erkennungseinheit spannt ein eigenes Netz auf. Anzeigeeinheit und Lichtcontroller melden sich darin an

Angabe	Wert
Heimnetz	für die Prüfung des eigenen Netzes abgeschaltet
Stromsparmodus des Funkmoduls	abgeschaltet
Eingriff während des Starts	keiner. Weder Tastatur noch Laptop noch SSH

14.6.3.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Anlage stromlos geschaltet, danach die Netzspannung hergestellt und die Stoppuhr gestartet.
2	Abgewartet, bis die Erkennungseinheit ihre Anwendung gestartet hatte und spielbereit war; Zeit abgelesen.
3	Dasselbe für die Anzeigeeinheit: Selbststart im Vollbild, Verbindung zur Erkennungseinheit, Zeit abgelesen.
4	Die Schritte 1 bis 3 zweimal wiederholt, je Gerät drei Durchgänge.
5	Heimnetz abgeschaltet und geprüft, ob sich Anzeigeeinheit und Lichtcontroller ohne Änderung der Einstellungen im Netz «DartVision» anmelden. Zugriff vom Mobiltelefon und über SSH geprüft.
6	Ein vollständiges Spiel im eigenen Netz gespielt, mit Erkennung, Brücke, Anzeige und Lichteffekten.
7	Paketverlust und Laufzeit beider Funkstrecken aus dem Systemprotokoll abgelesen.
8	Bildrate der drei Kameras über 436 Sekunden gleichzeitig mitgeschrieben.
9	Heimnetz im laufenden Spiel abgeschaltet und wieder eingeschaltet, drei Durchgänge; dabei zweimal ein Dart geworfen, während die Verbindung unterbrochen war.

14.6.3.5 Messaufbau



Abbildung 1: Display – Systemstart



Abbildung 2: Display – Spielbetrieb

14.6.3.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Kaltstart, A18

Zeit vom Herstellen der Netzspannung bis zur Spielbereitschaft, je Gerät drei Durchgänge. Heimnetz:

Gerät	1. Durchgang	2. Durchgang	3. Durchgang	Sollwert	Eingehalten
Anzeigeeinheit	51 s	56 s	52 s	höchstens 3 Minuten	ja
Erkennungseinheit	40 s	47 s	39 s	höchstens 3 Minuten	ja

DartVision-Netz:

Gerät	1. Durchgang	2. Durchgang	3. Durchgang	Sollwert	Eingehalten
Anzeigeeinheit	49 s	53 s	54 s	höchstens 3 Minuten	ja
Erkennungseinheit	120 s	115 s	121 s	höchstens 3 Minuten	ja

Kein Durchgang verlangte einen Eingriff: weder Anmeldung noch Tastatur noch Fernzugriff.

Prüffolge 2 — Eigenes Funknetz, A17 · A19

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Erkennungseinheit spannt das Netz «DartVision» auf	Netz steht ohne fremde Infrastruktur	bestanden
2	Anzeigeeinheit meldet sich an	ohne Änderung der Einstellungen	bestanden
3	Lichtcontroller meldet sich an	ohne Änderung der Einstellungen	bestanden
4	Heimnetz abgeschaltet	die Anlage läuft weiter	bestanden
5	Zugriff vom Mobiltelefon im Netz «DartVision»	Verbindung steht	bestanden
6	Wartungszugang über SSH mit Termius	Verbindung steht	bestanden
7	Vollständiges Spiel im eigenen Netz, alle vier Teilnehmer	Erkennung, Brücke, Anzeige und Lichteffekte arbeiten	bestanden

Der Wartungszugang über SSH ist darüber hinaus während der ganzen Entwicklung laufend genutzt worden.

Prüffolge 3 — Funkstrecken, A8

Strecke	Sollwert	Paketverlust	Laufzeit im Mittel
Erkennungseinheit zur Anzeigeeinheit	stabil	0 Prozent	16 ms
Erkennungseinheit zum Lichtcontroller	Befehle unter 1 s wirksam	0 Prozent	28 ms

Weitere Grösse	Wert
Höchste einzelne Antwortzeit zum Lichtcontroller	129 ms
Erster Zugriff auf den Lichtcontroller nach längerer Pause, Stromsparmodus abgeschaltet	0,264 s

Die 129 ms entstehen beim Auffrischen des LED-Rings, das den Netzwerkteil des Controllers kurz blockiert. Für die Lichtrückmeldung ist das ohne Wirkung: Sie läuft an Aufnahmegrenzen, nicht im Bildpfad.

Prüffolge 4 — Verbindungsabbruch und Wiederaufnahme, A8

Grösse	Wert
Durchgänge	3
Vorgehen	Heimnetz im laufenden Spiel ab- und wieder eingeschaltet
Verhalten des Spiels	lief nach dem Wiederverbinden normal weiter
Würfe während der Unterbrechung	2
Anzeige dieser Würfe nach dem Wiederverbinden	beide richtig angezeigt
Zeit bis zum Wiederangleich der Anzeige	rund 3 Sekunden ab Wiederherstellung der Verbindung
Spielabbruch	keiner

Prüffolge 5 — Drei Kameras gleichzeitig, A22

Grösse	Sollwert	Messwert
Messdauer	—	436 Sekunden
Bildrate je Kamera, gleichzeitig	rund 30 Bilder je Sekunde	3 × 30 Bilder je Sekunde
Kameras gleichzeitig in Betrieb	3	3

Prüffolge 6 — Prüfung der Kamerazuordnung, A5

Die Anlage prüft vor dem Spielstart, ob die drei Kameras richtig zugeordnet sind. Geprüft wird mit vertauschtem Stecker: Die Abweichung muss erkannt werden und der Start darf nicht selbsttätig weiterlaufen.

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Kamerastecker vertauscht, Anlage gestartet	Warnung erscheint	Warnung erscheint
2	Verhalten des Starts bei erkannter Abweichung	Stoppt	Stoppt
3	Bestätigung verlangt	ja	ja
4	Stecker zurückgesteckt	Zuordnung richtig	korrekt

14.6.3.7 Auswertung

Gegen die Sollwerte

Grösse	Wert
Längste gemessene Startzeit	121 s gegen einen Sollwert von 180 s
Abstand zum Sollwert	59 s, rund $^1/_3$ der zugelassenen Zeit bleiben ungenutzt
Startdurchgänge mit Eingriff	keiner von zwölf
Paketverlust auf beiden Funkstrecken	0 Prozent
Längste mittlere Laufzeit	28 ms gegen einen Sollwert von 1000 ms
Bildrate, drei Kameras gleichzeitig	3 × 30 Bilder je Sekunde über 436 Sekunden
Spielabbrüche bei Verbindungsabbruch	keiner von drei

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A5	Prüfung der Kamerazuordnung vor dem Spielstart, Warnung bei Abweichung	bestanden
A8	Zustand vollständig an die Anzeige übertragen, auch nach Verbindungsabbruch	bestanden
A17	Eigenes WLAN; Anzeige und Lichtcontroller verbinden sich selbsttätig	bestanden
A18	Nach dem Einschalten starten alle Teilsysteme selbstständig	bestanden
A19	Ein Laptop kann sich zu Wartungszwecken über SSH verbinden	bestanden
A22	Kameraauflösung trägt K2; drei Kameras gleichzeitig betreibbar	bestanden

14.6.3.8 Ergebnis

Erfüllt. Die Anlage ist nach längstens 121 Sekunden spielbereit, ohne Eingriff, in ihrem eigenen Funknetz und ohne fremde Infrastruktur. Beide Funkstrecken laufen ohne Paketverlust, die drei Kameras arbeiten gleichzeitig mit je rund 30 Bildern je Sekunde und ein Verbindungsabbruch im laufenden Spiel führt weder zum Abbruch noch zum Verlust eines Wurfs.

14.6.4 Prüfprotokoll P-03 — Strom und Leistung der 5-V-Schiene

14.6.4.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-03 — Strom- und Leistungsmessung der 5-V-Schiene
Gegenstand	Die gemeinsame 5-V-Zuleitung vom Netzteil zur Verteilklemme. In ihr liegt der Gesamtstrom aller Verbraucher: Erkennungseinheit mit drei Kameras, Lichtcontroller mit LED-Ring, Anzeigeeinheit mit Akkumodul.
Zweck	Die Prüfung, ob ein einziges Netzteil für die ganze Anlage ausreicht. Gemessen wird der Gesamtstrom in mehreren Betriebszuständen, darunter der ungünstigste.
Erfolgskriterium	K1 — «Der Hardware-Prototyp ist vollständig aufgebaut und betriebsbereit; alle drei Kameras, das Display und das LED-Band werden vom System angesteuert.» Die Strommessung ist der Teil des Nachweises, der den gleichzeitigen Betrieb aller Verbraucher an einer Speisung belegt.
Anforderungen	A20 — Energieversorgung aus einem zentralen Netzteil mit abgesicherter Verteilung, Dimensionierung anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher. A24 — Auslegung auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve, rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen. Dieses Protokoll trägt den messtechnischen Teil von A24.
Sollwert	Gesamtstrom der 5-V-Schiene höchstens 9 A, Ziel unter 8 A
Messtage	Gegenmessung der Messmittel: Freitag, 15.10.2026. Strommessung: Samstag, 16.10.2026.
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

14.6.4.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
M5Stack INA226	Strom- und Spannungsmessbaustein, in die 5-V-Zuleitung eingeschleift, auf Steckbrett	Strom, Spannung, Leistung	0,01 A / 0,01 V	keine zeitliche Begrenzung
M5Stack Core S3	Anzeigeeinheit am INA226, stellt die gemessenen Werte dar und macht sie ablesbar	—	—	keine; das Gerät misst nicht, es zeigt an
Benning MM 1-2	Multimeter, in der Gegenmessung mit dem INA226 in Reihe im selben Zweig	Strom, Spannung	1 mA / 0,1 mV	10 A für höchstens 10 Minuten

Die abgelesenen Werte stammen vom INA226; der Core S3 ist seine Anzeige. Der Benning ist nur in der Gegenmessung im Einsatz.

14.6.4.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, unverändert gegenüber dem Systemstand. Der INA226 sitzt in der gemeinsamen 5-V-Zuleitung zwischen Netzteilklemme und Verteilklemme.
Speisung	Mean Well LRS-50-5, auf 5,15 V eingestellt, über alle Prüffolgen unverändert
Umgebungstemperatur	23,1 °C
Lichtcontroller	Strombegrenzung 3400 mA mit automatischem Helligkeitsbegrenzer

Angabe	Wert
Betriebszustand	je Prüffolge angegeben. Massgebend ist Prüffolge 4: voller Betrieb mit angeschlossener Anzeigeeinheit samt Akkumodul im Ladebetrieb.

14.6.4.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Benning und INA226 in Reihe in denselben Zweig gelegt, beide Anzeigen gleichzeitig abgelesen, in zwei Betriebszuständen — Spielbetrieb und Ruhezustand.
2	INA226 in die 5-V-Zuleitung eingeschleift, Core S3 als Anzeige angeschlossen, Poti des Netzteils geprüft und unverändert gelassen, Umgebungstemperatur abgelesen.
3	Erkennungseinheit abgehängt. Lichteinheit allein gemessen, in drei Zuständen: Rot, Grün, Vollweiss bei aktivem Begrenzer.
4	Erkennungseinheit wieder angehängt, drei Kameras in Betrieb, Anzeigeeinheit am Akkumodul ohne Ladebetrieb. Vier Zustände gemessen: Ruhezustand, Spielbetrieb, Startsequenz Rot, Startsequenz Grün.
5	Akkumodul in den Ladebetrieb gebracht und der Spielbetrieb erneut gemessen. Das ist der ungünstigste Betriebsfall der Anlage.
6	Spielbetrieb über 30 Minuten gehalten, danach `vcgencmd get_throttled` auf der Erkennungseinheit abgefragt.
7	Aufnahmen des Messaufbaus und der abgelesenen Anzeige erstellt.

14.6.4.5 Messaufbau



Abbildung 1: Messaufbau — Prüffolge 2, Zeile 3



Abbildung 2: Spielbetrieb — Prüffolge 3, Zeile 5

14.6.4.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Gegenmessung der Messmittel

Benning und INA226 in Reihe im selben Zweig, beide Anzeigen gleichzeitig abgelesen. Eigener Messvorgang; er berichtigt keinen Wert der übrigen Prüffolgen. Angabe des Verfassers.

Betriebszustand	Benning	INA226	Abweichung
Spielbetrieb	3,73 A	3,71 A	0,54 %
Ruhezustand	1,79 A	1,78 A	0,56 %

14.6.5 Prüffolge 2 — Lichteinheit allein, A20

Lichtcontroller und LED-Ring an der Speisung, Erkennungseinheit abgehängt.

Nr.	Zustand	Strom	Spannung	Leistung
1	Rot	0,95 A	5,11 V	4,86 W
2	Grün	0,96 A	5,11 V	4,88 W
3	Vollweiss	2,19 A	5,05 V	11,07 W

14.6.6 Prüffolge 3 — Anlage im Betrieb, A20

Erkennungseinheit mitangehängt, drei Kameras in Betrieb, Anzeigeeinheit am Akkumodul ohne Ladebetrieb.

Nr.	Betriebszustand	Strom	Spannung	Leistung
4	Ruhezustand	1,76 A	5,07 V	8,90 W
5	Spielbetrieb	3,75 A	4,97 V	18,64 W
6	Startsequenz Rot	1,81 A	5,06 V	9,17 W
7	Startsequenz Grün	1,98 A	5,05 V	10,02 W

14.6.7 Prüffolge 4 — Ungünstigster Betriebsfall, A20 · A24

Voller Betrieb mit angeschlossener Anzeigeeinheit samt Akkumodul im Ladebetrieb. Angabe des Verfassers.

Nr.	Betriebszustand	Strom	Spannung	Leistung
8	Spielbetrieb, Anzeigeeinheit lädt	5,98 A	4,86 V	29,06 W

14.6.8 Prüffolge 5 — Dauer und Drosselung

Spielbetrieb über die gesamte Messdauer, Werte am Ende abgelesen. Angabe des Verfassers.

Grösse	Wert	Sollwert
Messdauer im Spielbetrieb	30 Minuten	30 Minuten
`vcgencmd get_throttled` am Ende	`0x0`	`0x0`

`0x0` heisst: keine Drosselung, keine Unterspannung über die ganze Dauer.

14.6.8.1 Auswertung

Gegen den Sollwert

Grösse	Wert
Sollwert	höchstens 9 A, Ziel unter 8 A
Höchster gemessener Strom	5,98 A, Prüffolge 4, Spielbetrieb mit ladender Anzeigeeinheit
Ausnutzung des Netzteils	59,8 % des Nennstroms von 10 A, 58 % der Nennleistung von 50 W
Abstand zum Sollwert	3,02 A unter der Grenze, 2,02 A unter dem Ziel
Reserve bis zum Nennstrom	4,02 A

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A20	Zentrales Netzteil mit abgesicherter Verteilung, Dimensionierung anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher	bestanden
A24	Auslegung auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve, rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen	bestanden

14.6.8.2 Ergebnis

Erfüllt. Der höchste gemessene Gesamtstrom der 5-V-Schiene beträgt 5,98 A im ungünstigsten Betriebsfall und liegt damit unter dem Sollwert von 9 A.

14.6.9 Prüfprotokoll P-04 — Temperatur am laufenden Aufbau

14.6.9.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-04 — Temperaturmessung an vier Stellen des Aufbaus
Gegenstand	Vier Messstellen am laufenden Aufbau und die Raumluft als Bezug: Gehäuse des Raspberry Pi 5 der Erkennungseinheit, Gehäusewand des Netzteils, Hauptgehäuse unten, Hauptgehäuse oben.
Zweck	Die Prüfung, ob der Aufbau im Dauerbetrieb thermisch in seinem Bereich bleibt und ob das Netzteil in seiner Leistung abgemindert werden muss. Gemessen wird über eine Stunde im Spielbetrieb, bis die Werte auslaufen.
Erfolgskriterium	K1 — «Der Hardware-Prototyp ist vollständig aufgebaut und betriebsbereit; alle drei Kameras, das Display und das LED-Band werden vom System angesteuert.» Die Temperaturmessung ist der Teil des Nachweises, der den Dauerbetrieb dieses Aufbaus über eine Stunde belegt.
Anforderungen	A20 — Energieversorgung aus einem zentralen Netzteil mit abgesicherter Verteilung, Dimensionierung anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher. A24 — Auslegung auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve, rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen. Dieses Protokoll trägt die Frage, ob die Auslegung gegen die volle oder gegen eine abgeminderte Nennleistung zu halten ist.
Sollwert	Gehäusetemperatur des Netzteils deutlich unter 70 °C
Messdauer	Vier Durchläufe zu je 60 Minuten, Ablesung alle 5 Minuten — 13 Ablesungen je Durchlauf
Messtag	Sonntag, 16.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

Gemessen wird am laufenden Aufbau. Alle Werte werden gegen die Raumluft berichtet, nicht absolut. Der Berührungsschutz ist ein Blech mit Lüftungsschlitzen.

14.6.9.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
Innen-/Aussenthermometer mit Kabelfühler, genauer Typ nicht anwendbar	Der Kabelfühler liegt an der Messstelle, der eingebaute Fühler erfasst die Raumluft	Temperatur aussen und innen, Luftfeuchte	0,1 °C	Genauigkeit ±0,5 °C. Die Auflösung ist feiner als die Genauigkeit — eine Ablesung ist auf 0,1 °C ablesbar, aber nicht auf 0,1 °C genau

Es stand ein einziges Gerät zur Verfügung, mit einem Kabelfühler. Die vier Messstellen sind deshalb nicht gleichzeitig, sondern in vier getrennten Durchläufen erfasst worden.

14.6.9.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, unverändert über alle vier Durchläufe. Das Netzteil ist senkrecht eingebaut.
Zustand der Anlage	in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme ist in P-01 festgehalten
Gehäusezustand	Berührungsschutz montiert, über alle vier Durchläufe unverändert
Betriebszustand	Spielbetrieb, in jedem Durchlauf über die ganze Dauer unverändert

Angabe	Wert
Ausgangszustand jedes Durchlaufs	Aufbau auf Raumtemperatur abgekühlt. Raumluft bei Beginn 24,5 °C
Fühlerlagen	je Durchlauf eine Messstelle, innerhalb des Durchlaufs unverändert

Die vier Messstellen tragen die Bezeichnungen des Erfassungsblattes: 1 Gehäuse Pi 5 · 2 Netzteil · 3 Hauptgehäuse unten · 4 Hauptgehäuse oben. Die Messstellen 1 bis 4 liegen am Bauteil und erfassen eine Wandtemperatur, nicht die Luft daneben.

14.6.9.4 Prüfablauf

Die Prüffolge besteht aus vier Durchläufen. Je Durchlauf lag der Kabelfühler an einer Messstelle; der eingebaute Fühler des Geräts erfasste die Raumluft. Ein Durchlauf wurde erst gestartet, nachdem der Aufbau wieder auf Raumtemperatur abgekühlt war.

Schritt	Handlung
1	Kabelfühler an die Messstelle des Durchlaufs gelegt, Lage für die Dauer des Durchlaufs festgelegt.
2	Anlage eingeschaltet und in den Spielbetrieb gebracht. Der Zeitpunkt des Einschaltens ist die Laufzeit 0.
3	Ablesung bei Laufzeit 0, danach alle 5 Minuten über 60 Minuten — je Ablesung die Messstelle und die Raumluft. Der Betriebszustand blieb dabei unverändert.
4	Anlage ausgeschaltet und abkühlen gelassen, bis der Aufbau wieder Raumtemperatur erreicht hatte.
5	Schritte 1 bis 4 für die übrigen drei Messstellen wiederholt.
6	Aufnahmen des Messaufbaus und der abgelesenen Anzeige erstellt.

14.6.9.5 Messaufbau



Abbildung 1: Messaufbau Laufzeit 0

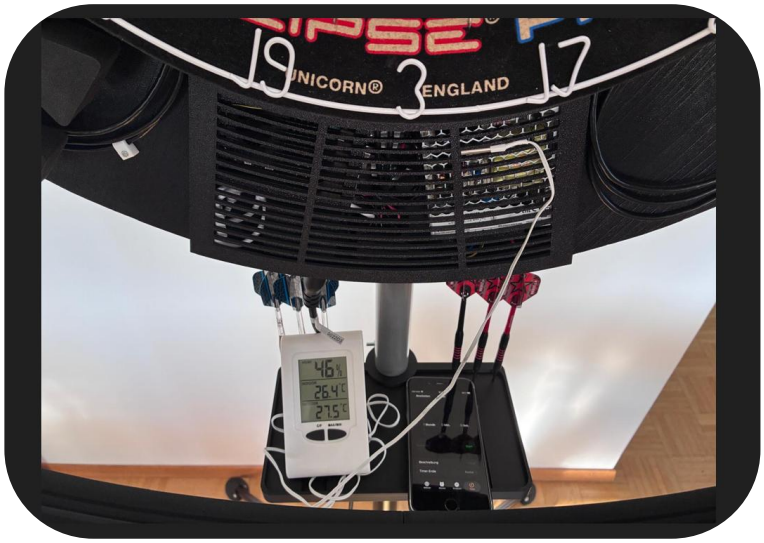


Abbildung 2: Position Temperarturfühler



Abbildung 3: Aufbau Durchführung

14.6.9.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Die vier Durchläufe, A20 · A24

Alle Werte in °C. Eine Zeile je Ablesung, von der Laufzeit 0 bis 60 Minuten; je Spalte ein Durchlauf.

Laufzeit [min]	1 Gehäuse Pi 5	2 Netzteil	3 Hauptgeh. unten	4 Hauptgeh. oben	Raumluft
0	26,2	26,2	26,2	26,2	24,5
5	32,6	29,6	28,5	30,2	25,0
10	38,1	31,8	30,1	33,1	25,1
15	39,1	33,1	31,2	35,1	25,1
20	40,2	33,9	32,0	36,5	25,2
25	41,2	34,5	32,6	37,5	25,3
30	41,7	34,9	33,0	38,2	25,3
35	42,2	35,3	33,4	38,7	25,4
40	42,2	36,5	33,7	39,0	25,3

Laufzeit [min]	1 Gehäuse Pi 5	2 Netzteil	3 Hauptgeh. unten	4 Hauptgeh. oben	Raumluft
45	42,7	35,7	33,9	39,4	25,3
50	43,3	35,8	34,2	39,6	25,3
55	43,3	35,7	34,5	39,6	25,3
60	42,7	35,8	34,4	39,7	25,4

14.6.9.7 Auswertung

Gegen den Sollwert

Grösse	Wert
Sollwert	Gehäusetemperatur des Netzteils deutlich unter 70 °C
Höchster Wert an Messstelle 2	36,5 °C bei 40 Minuten
Abstand zum Sollwert	33,5 K
Wert am Ende der Prüffolge	35,8 °C, Übertemperatur 10,4 K über der Raumluft

Beharrung der vier Messstellen

Beharrung gilt als erreicht, wenn drei aufeinanderfolgende Ablesungen innerhalb von 0,1 K liegen.

Messstelle	Höchstwert	Übertemperatur	Beharrung
1 Gehäuse Pi 5	43,3 °C bei 50 min	18,0 K	nein
2 Netzteil	36,5 °C bei 40 min	11,2 K	ja
3 Hauptgehäuse unten	34,5 °C bei 55 min	9,2 K	nein
4 Hauptgehäuse oben	39,7 °C bei 60 min	14,3 K	ja

An den Messstellen 1 und 3 ist der angegebene Wert kein Beharrungswert, sondern der Höchstwert nach 60 Minuten.

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A20	Zentrales Netzteil mit abgesicherter Verteilung, Dimensionierung anhand einer Lastberechnung über alle Verbraucher	bestanden
A24	Auslegung auf den maximalen Gesamtstrom mit Reserve, rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen	bestanden

14.6.9.8 Ergebnis

Erfüllt. Die höchste Temperatur am Netzteil beträgt 36,5 °C und liegt damit deutlich unter dem Sollwert von 70 °C. An zwei der vier Messstellen ist Beharrung erreicht, an den beiden übrigen ist der Höchstwert nach 60 Minuten angegeben.

14.6.10 Prüfprotokoll P-05 — Bedienung und Korrektur am Gerät

14.6.10.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-05 — Bedienung der Anzeigeeinheit, Korrekturfälle und Spielablauf
Gegenstand	Die Bedienoberfläche der Anzeigeeinheit: Menüführung, Spielauswahl, Spielansicht mit den drei Wurfkacheln, der Korrekturdialog und das Spielende. Dazu die Zeit vom Einstich bis zur Anzeige der Wertung.
Zweck	Der Nachweis, dass die Anlage ohne zusätzliche Eingabegeräte bedienbar ist, dass jeder Dart einer Aufnahme am Gerät korrigierbar ist und dass die Korrektur ohne Spielabbruch wirkt.
Erfolgskriterium	K4 — «Menü und manuelle Korrektur sind am Touch-Display bedienbar; ein Fehlwurf oder Erkennungsfehler lässt sich ohne Spielabbruch korrigieren, nachtragen oder als Fehlwurf erfassen.»
Anforderungen	A1 · A4 · A6 · A9 · A10 · A11 · A12 · A13 · A25
Sollwerte	Wertung innerhalb von 5 s nach dem Einstich · jeder Dart am Gerät korrigierbar, ohne Spielabbruch · Bedienung ohne Tastatur und Maus
Umfang	Die Bedienung während des Nachweislaufs und die Prüfungen am Gerät, die daneben durchgeführt wurden.
Messtag	Montag, 17.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

14.6.10.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Grenzen
Anzeigeeinheit	Raspberry Pi 3 B+ mit Touch-Display. Prüfling und die Ansicht	bediente Handlung, Zustand der Wurfkacheln, Spielstand	N.A	N.A
Beobachtung am Gerät	Nach jeder Handlung festhalten.	Wirkung der Handlung, Abbruch ja oder nein	N.A	Eine Beobachtung ist keine Messung mit Auflösung.
Stoppuhr am Mobiltelefon	Zeit. Einstich bis Wertung angezeigt.	Zeit	0,1 s	Reaktionszeit

14.6.10.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, unverändert
Anzeigeeinheit	am Ständer montiert, Anzeige im Querformat, Selbststart im Vollbild
Eingabegeräte	keine Tastatur und keine Maus angeschlossen
Betriebsart	laufendes Spiel, 301 und 501, Ein- und Zweispieler, Double-Out und Single-Out
Beleuchtung	Raumlicht und Ringbeleuchtung, Strombegrenzung aktiv

14.6.10.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Anlage gestartet. Die Anzeigeeinheit lief selbsttätig im Vollbild an.
2	Spiel über das Menü ausgewählt und gestartet, ausschliesslich über das Touch-Display.
3	Über beide Wurfreihen gespielt, 200 gewertete Würfe. Die Wurfkacheln und der Spielstand wurden dabei laufend abgelesen.
4	Jeden Wurf, den die Anlage nicht gewertet hat, über die leere Wurfkachel von Hand nachgetragen, damit das Spiel weiterlief.
5	Nach jeder Handlung geprüft, ob die Anzeige folgt und ob das Spiel weiterläuft.
6	Die neun Korrekturfälle am Gerät durchgegangen, je Fall mit der erwarteten Wirkung verglichen.
7	Die Zeit vom Einstich bis zur Anzeige zehnmal mit der Stoppuhr genommen.
8	Den Spielablauf geprüft: vierter Dart vor dem Entfernen, Spielvarianten am Menü, beide Angebote nach Spielende.

14.6.10.5 Messaufbau



Abbildung 1: Aufnahme der Spielansicht mit den drei Wurfkacheln und dem Spielstand

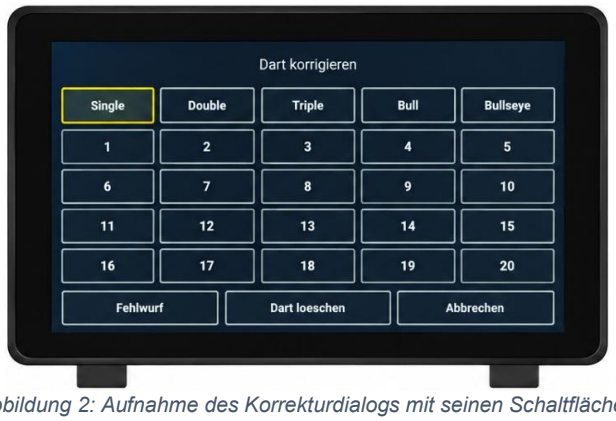


Abbildung 2: Aufnahme des Korrekturdialogs mit seinen Schaltflächen

14.6.10.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Nicht erkannte Würfe und ihr Nachtrag, A10

Jede Zeile ist ein Wurf, den die Anlage nicht gewertet hat. Die Fundstelle nennt Wurfreihe und Wurfnummer des Nachweislaufs. Er selbst ist in P-06 festgehalten und folgt diesem Protokoll.

Nr.	Fundstelle im Nachweislauf	Geworfen	Wurfkachel	Nachgetragen	Punktestand folgt
1	Wurfreihe 1, Wurf 55	D16	leer	D16	ja
2	Wurfreihe 1, Wurf 76	D15	leer	D15	ja
3	Wurfreihe 1, Wurf 86	S10	leer	S10	ja
4	Wurfreihe 2, Wurf 25	S9	leer	S9	ja
5	Wurfreihe 2, Wurf 26	T6	leer	T6	ja
6	Wurfreihe 2, Wurf 78	D16	leer	D16	ja
7	Wurfreihe 2, Wurf 84	S13	leer	S13	ja
8	Wurfreihe 2, Wurf 85	S9	leer	S9	ja
9	Wurfreihe 2, Wurf 90	D15	leer	D15	ja
10	Wurfreihe 2, Wurf 91	S15	leer	S15	ja

In allen zehn Fällen blieb die Wurfkachel leer: Die Anlage hat weder ein Feld noch eine Null angezeigt. Der Wurf ist danach über die leere Wurfkachel von Hand eingetragen worden, und zwar in allen zehn Fällen auf das Feld, das tatsächlich getroffen war. Der Punktestand folgte jedes Mal.

Prüffolge 2 — Bedienung ohne zusätzliche Eingabegeräte, A25

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Selbststart der Anzeigeeinheit im Vollbild	läuft selbsttätig an	bestanden
2	Spielauswahl über das Menü	ausschliesslich am Touch-Display	bestanden
3	Tastatur angeschlossen	nein	keine
4	Maus angeschlossen	nein	keine
5	Ablesbarkeit der Wurfkacheln und des Spielstandes im Spiel	durchgehend	bestanden

Prüffolge 3 — Spielfluss

Grösse	Wert
Gewertete Würfe im Lauf	200
Davon von der Anlage nicht gewertet	10
Davon von Hand richtig nachgetragen	10
Spielabbrüche wegen der Bedienung	keiner
Spielabbrüche wegen eines Systemausfalls	keiner
Dauer des Laufs	75 Minuten

Prüffolge 4 — Die Korrekturfälle am Gerät, A9 · A11 · A12

Die neun Fälle sind aus dem Wortlaut von K4 abgeleitet. Sie prüfen, was ein automatisierter Test nicht prüfen kann: die Wirkung am laufenden Gerät.

Nr.	Fall	Erwartet	Ergebnis	Kein Spielabbruch
1	Wert ändern — erkannten Dart auf ein anderes Feld korrigieren	Punktestand folgt der Korrektur	bestanden	bestanden
2	Nachtragen — nicht erkannten Wurf über die leere Wurfkachel eingeben	Wurf steht in der Kachel, Punktestand folgt	bestanden, 10/10	bestanden
3	Als Fehlwurf erfassen — Dart auf «Fehlwurf» setzen	Kachel bleibt belegt, Punktzahl 0	bestanden	bestanden
4	Löschen — Dart entfernen	Die Aufnahme hat danach einen Wurf weniger	bestanden	bestanden
5	Überwurf erzeugen — einen Wurf so korrigieren, dass der Rest unter null fällt	Banner erscheint, Punktestand wird zurückgesetzt	bestanden, 10/10	bestanden
6	Überwurf entfernen — denselben Wurf zurückkorrigieren	Banner und Rücksetzung verschwinden regelkonform	bestanden, 10/10	bestanden
7	Sieg erzeugen und entfernen — Ausschlusswurf korrigieren, dann zurück	Sieg entsteht und entfällt regelkonform	bestanden, 10/10	bestanden
8	Korrektur nach dem Spielerwechsel — letzte Aufnahme des vorigen Spielers korrigieren	Die Aufnahme bleibt korrigierbar	bestanden, 10/10	bestanden
9	Menü — Spielauswahl vollständig am Touch-Display, ohne Tastatur und Maus	vollständig bedienbar	bestanden	bestanden

Die Fälle 5 bis 7 sind die gewichtigsten der Prüffolge. Sie prüfen, dass die Korrektur Überwurf und Sieg regelkonform erzeugt und wieder entfernt — die Aussage, auf der A12 beruht. Der automatisierte Testbestand deckt die Spiellogik dieser Fälle ab. Diese Prüffolge deckt ihre Wirkung am Gerät, mit zehn von zehn richtigen Durchgängen.

Prüffolge 5 — Spielablauf und Anzeige, A4 · A6 · A13

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Eine Aufnahme umfasst drei Darts	nach dem dritten wartet das System auf das Entfernen	bestanden
2	Vierter Wurf vor dem Entfernen der Darts	wird nicht gewertet	bestanden
3	Spielvariante 501 über das Menü gewählt	wählbar und gestartet	bestanden
4	Spielvariante 301 über das Menü gewählt	wählbar und gestartet	bestanden
5	Ein Spieler und zwei Spieler	beides wählbar	bestanden
6	Double-Out zugeschaltet und abgeschaltet	beides wählbar	bestanden
7	Nach Spielende: neues Spiel mit gleichen Einstellungen	wird angeboten und startet	bestanden
8	Nach Spielende: Rückkehr ins Menü	wird angeboten und führt ins Menü	bestanden

Die Zeilen 3 bis 6 sind im Nachweislauf angefallen: Über die 200 Würfe wurden 301 und 501 gespielt, mit einem und mit zwei Spielern, mit Double-Out und mit Single-Out. Jede dieser Einstellungen ist über das Menü gewählt worden.

Prüffolge 6 — Zeit vom Einstich bis zur Anzeige, A1

Gemessen mit der Stoppuhr am Mobiltelefon, vom Einstich des Darts bis zum Erscheinen der Wertung in der Wurfkachel.

Nr.	Zeit vom Einstich bis zur Anzeige	Sollwert	Eingehal-ten
1	1,5 s	höchstens 5 s	ja
2	1,0 s	höchstens 5 s	ja
3	2,0 s	höchstens 5 s	ja
4	1,5 s	höchstens 5 s	ja
5	2,5 s	höchstens 5 s	ja
6	1,5 s	höchstens 5 s	ja
7	3,5 s	höchstens 5 s	ja
8	1,0 s	höchstens 5 s	ja
9	2,0 s	höchstens 5 s	ja
10	2,0 s	höchstens 5 s	ja

14.6.10.7 Auswertung

Gegen den Sollwert

Grösse	Wert
Nicht erkannte Würfe, über die leere Wurfkachel richtig nachgetragen	10 von 10
Davon mit Spielabbruch	keiner
Korrekturfälle bestanden	9 von 9
Punkte zum Spielablauf bestanden	8 von 8
Höchste gemessene Zeit bis zur Anzeige	3,5 s gegen Sollwert von 5 s
Bedienung ohne Tastatur und Maus	über den ganzen Lauf

Die Zeit bis zur Anzeige

Grösse	Wert
Ablesungen	10
Kleinster Wert	1,0 s
Höchster Wert	3,5 s
Mittelwert	1,85 s
Sollwert	höchstens 5 s
Abstand des höchsten Wertes zum Sollwert	1,5 s

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A1	Anzeige der Wertung innerhalb von 5 s nach dem Einstich	bestanden
A4	Eine Aufnahme umfasst drei Darts; danach wartet das System auf das Entfernen	bestanden
A6	Spielvarianten 501 und 301, ein oder zwei Spieler, Double-Out	bestanden
A9	Jeder Dart korrigierbar: Wert ändern, als Fehlwurf setzen, löschen	bestanden
A10	Ein nicht erkannter Dart lässt sich über die leere Wurfkachel nachtragen	bestanden
A11	Nach dem Spielerwechsel bleibt die letzte Aufnahme korrigierbar	bestanden
A12	Korrekturen wirken regelkonform — die Wirkung am Gerät	bestanden
A13	Nach Spielende neues Spiel oder Rückkehr ins Menü	bestanden
A25	Touch-Display, ohne zusätzliche Eingabegeräte bedienbar	bestanden

Die Spiellogik hinter A7 und A12 wird im automatisierten Testbestand nachgewiesen, P-08. Dieses Protokoll trägt, was daneben am Gerät zu sehen ist.

14.6.10.8 Ergebnis

Erfüllt. Die Anlage ist über das Touch-Display bedienbar, ohne zusätzliche Eingabegeräte. Ein nicht erkannter Wurf lässt sich am laufenden Spiel nachtragen. Zehnmal belegt, jedes Mal mit dem richtigen Feld und ohne Spielabbruch. Alle neun Korrekturfälle sind bestanden, alle acht Punkte zum Spielablauf ebenfalls und die Wertung erscheint in zehn von zehn Ablesungen innerhalb des Sollwerts von 5 Sekunden.

14.6.11 Prüfprotokoll P-06 — Wertungsnachweis über 200 Würfe

14.6.11.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-06 — Wertungsnachweis des Nachweislaufs
Gegenstand	Die Erkennungs- und Wertungskette als Ganzes: drei Kameras, Erkennung, Boardgeometrie, Konsensprüfung und Spiellogik. Geprüft wird das Ergebnis, das die Anlage anzeigt, gegen das Feld, das tatsächlich getroffen wurde.
Zweck	Der Nachweis, wie genau die Anlage wertet. Gemessen wird über zwei Wurfreihen zu je 100 Würfen im laufenden Spielbetrieb, nicht an gestellten Einzelwürfen.
Erfolgskriterien	K2 — die Wertungsgüte der Anlage. K5 — der Spielbetrieb über mehrere Varianten hinweg.
Anforderungen	A2 — Erkennung und Wertung des getroffenen Feldes. A3 — kein Wurf wird doppelt gewertet. A14 — die Anzeige ist aus Spielentfernung ablesbar. A15 — im Spielbetrieb leuchtet das LED-Band konstant weiss als Kamerabeleuchtung. A16 — die Lichteffekte folgen dem Spielereignis.
Sollwerte	Je Grösse festgelegt und in Abschnitt 7 neben ihrem Ergebnis genannt.
Umfang	Zwei Wurfreihen zu je 100 gewerteten Würfen, zusammen 200
Messtag	Montag, 17.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`, Arbeitsverzeichnis ohne offene Änderungen

Als Wertung zählt ein Wurf, den die Anlage in den Zustand scored überführt hat. Die Reihenfolge der Zeilen ist die Reihenfolge der Würfe.

14.6.11.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
Die Anlage	Liefert je Wurf das gewertete Feld und Spielstand. Ablesen von Anzeigeeinheit	gewertetes Feld, Ring, Spielstand	ein Feld	N.A
Beobachtung des Werfers	Nach jedem Wurf wird das tatsächlich getroffene Feld an der Scheibe abgelesen und notiert, vor dem Herausziehen des Pfeils	tatsächlich getroffenes Feld	ein Feld	Beobachtung
Massband	Abstand der Anzeige bei der Ablesbarkeitsprüfung	Länge	1 cm	—

Die Referenz dieses Protokolls ist die Beobachtung an der Scheibe. Sie ist kein Messmittel mit Datenblatt. Und genau dort liegt ihre Grenze: Bei acht Würfen lag der Einstich auf einer Grenze und dort ist die Referenz selbst eine Beurteilung.

14.6.11.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, Kamerapositionen über beide Wurfreihen unverändert
Kalibrierstand	unverändert gegenüber dem Systemstand

Angabe	Wert
Beleuchtung	Raumlicht und Ringbeleuchtung, Strombegrenzung 3400 mA aktiv
Fremdlicht	Raumlicht, keine gerichtete Fremdquelle
Konsensprüfung	in beiden Wurfreihen aktiv
Werfer	Timo Meier
Gespielte Varianten	301 und 501, Ein- und Zweispieler, Double-Out und Single-Out
Dauer des Laufs	75 Minuten ohne Abbruch

14.6.11.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Anlage gestartet, Systemstand und Kalibrierstand geprüft, Beleuchtung eingeschaltet.
2	Im laufenden Spiel geworfen. Nach jedem Wurf das tatsächlich getroffene Feld an der Scheibe abgelesen und neben dem gewerteten Feld notiert, vor dem Herausziehen des Pfeils.
3	Ein Wurf, den die Anlage nicht gewertet hat, von Hand eingegeben, damit das Spiel weiterlief. Die Zeile trägt dann das von Hand nachgetragene Feld.
4	Nach 100 gewerteten Würfen die zweite Wurfreihe unter denselben Bedingungen begonnen.
5	Während des Laufs die zehn Lichtereignisse einzeln festgehalten und der Wechsel zwischen Vollweiss und Ruhezustand geprüft.
6	Nach dem Lauf die Anzeige aus Spielentfernung abgelesen, in drei Durchgängen.
7	Aufnahmen des Aufbaus und der Anzeige erstellt.

14.6.11.5 Messaufbau



Abbildung 1: Aufnahme der Scheibe mit steckenden Pfeilen



Abbildung 2: Aufnahme der Anzeige im Spielbetrieb, mit Spielstand und den drei Wurfkacheln

14.6.11.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Wurfreihe 1, 100 Würfe, A2 · A3

Die Tabelle steht in zwei Blöcken nebeneinander: links die Würfe 1 bis 50, rechts 51 bis 100. Ein nicht erkannter Wurf trägt unter «Gewertet» den Eintrag «leer»: Die Anlage hat dort nichts angezeigt, weder ein Feld noch eine Null. Eine 0 steht nur dort, wo die Anlage ein Feld gewertet hat, das keinem Wurf entspricht. «Grenze» heisst, dass der Einstich auf einer Draht- oder Ringgrenze lag; «Doppelt», dass derselbe Wurf zweimal gewertet wurde.

Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt	Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt
1	T20	T20	richtig	—	nein	51	S11	S11	richtig	—	nein
2	S15	S15	richtig	—	nein	52	S20	S20	richtig	—	nein
3	S11	S11	richtig	—	nein	53	S6	S6	richtig	—	nein
4	S10	S10	richtig	—	nein	54	S11	S11	richtig	—	nein
5	S14	S14	richtig	—	nein	55	D16	leer	keine	—	nein
6	S19	S19	richtig	—	nein	56	S18	S18	richtig	—	nein
7	S3	S3	richtig	—	nein	57	S5	S5	richtig	—	nein
8	S20	S20	richtig	—	nein	58	T5	T5	richtig	—	nein
9	S4	S4	richtig	—	nein	59	S6	T6	falsch	ja	nein
10	T9	T9	richtig	—	nein	60	S12	S12	richtig	—	nein
11	S7	S7	richtig	—	nein	61	S20	S20	richtig	—	nein
12	S6	S10	falsch	ja	nein	62	S8	S8	richtig	—	nein
13	S20	S20	richtig	—	nein	63	S13	S13	richtig	—	nein
14	S11	S11	richtig	—	nein	64	D20	D20	richtig	—	nein
15	D19	0	falsch	—	nein	65	S8	S8	richtig	—	nein
16	T15	T15	richtig	—	nein	66	S20	S20	richtig	—	nein
17	S16	S16	richtig	—	nein	67	T8	T8	richtig	—	nein
18	D18	D18	richtig	—	nein	68	S17	S17	richtig	—	nein

Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt	Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt
19	S19	S19	richtig	—	nein	69	S11	S11	richtig	—	nein
20	S6	S6	richtig	—	nein	70	25	25	richtig	—	nein
21	S20	S20	richtig	—	nein	71	T17	T17	richtig	—	nein
22	D17	D17	richtig	—	nein	72	S17	S17	richtig	—	nein
23	S9	S9	richtig	—	nein	73	T20	T20	richtig	—	nein
24	S14	S14	richtig	—	nein	74	T14	T14	richtig	—	nein
25	S4	S4	richtig	—	nein	75	S12	S12	richtig	—	nein
26	S19	S19	richtig	—	nein	76	D15	leer	keine	—	nein
27	D20	0	falsch	ja	nein	77	S2	S2	richtig	—	nein
28	T8	T8	richtig	—	nein	78	S18	S18	richtig	—	nein
29	S10	S10	richtig	—	nein	79	S12	S12	richtig	—	nein
30	T14	T14	richtig	—	nein	80	S11	S11	richtig	—	nein
31	S17	S17	richtig	—	nein	81	S5	S5	richtig	—	nein
32	S20	S20	richtig	—	nein	82	S8	S8	richtig	—	nein
33	S14	S14	richtig	—	nein	83	BULL	BULL	richtig	—	nein
34	S1	S1	richtig	—	nein	84	S5	S5	richtig	—	nein
35	S3	S3	richtig	—	nein	85	S3	S3	richtig	—	nein
36	S20	S20	richtig	—	nein	86	S10	leer	keine	—	nein
37	S14	S14	richtig	—	nein	87	S14	S14	richtig	—	nein
38	S10	S10	richtig	—	nein	88	T20	T20	richtig	—	nein
39	S10	S10	richtig	—	nein	89	S5	S5	richtig	—	nein
40	D4	D4	richtig	—	nein	90	S6	25	falsch	ja	nein
41	S11	S11	richtig	—	nein	91	S20	S20	richtig	—	nein
42	S9	S9	richtig	—	nein	92	S17	S17	richtig	—	nein
43	S5	S5	richtig	—	nein	93	S7	S7	richtig	—	nein
44	BULL	BULL	richtig	—	nein	94	D4	D4	richtig	—	nein
45	S14	S14	richtig	—	nein	95	S16	S16	richtig	—	nein
46	S1	S1	richtig	—	nein	96	25	25	richtig	—	nein
47	S3	S3	richtig	—	nein	97	S14	S14	richtig	—	nein
48	S16	S16	richtig	—	nein	98	S5	S5	richtig	—	nein
49	D2	D2	richtig	—	nein	99	S12	S12	richtig	—	nein
50	T1	T1	richtig	—	nein	100	BULL	BULL	richtig	—	nein

Prüffolge 2 — Wurfreihe 2, 100 Würfe, A2 · A3

Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt	Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt
1	D18	D18	richtig	—	nein	51	S9	S9	richtig	—	nein
2	S11	S11	richtig	—	nein	52	D17	D17	richtig	—	nein
3	D3	D3	richtig	—	nein	53	S4	S4	richtig	—	nein
4	S1	S1	richtig	—	nein	54	S12	S12	richtig	—	nein
5	S5	S5	richtig	—	nein	55	D12	D12	richtig	—	nein
6	S19	S3	falsch	—	nein	56	S15	S15	richtig	—	nein

Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt	Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt
7	S4	S4	richtig	—	nein	57	S14	S14	richtig	—	nein
8	S17	S17	richtig	—	nein	58	BULL	BULL	richtig	—	nein
9	S1	S1	richtig	—	nein	59	S20	S20	richtig	—	nein
10	T14	T14	richtig	—	nein	60	S10	S10	richtig	—	nein
11	25	25	richtig	—	nein	61	D20	0	falsch	—	nein
12	S12	S5	falsch	ja	nein	62	S7	S7	richtig	—	nein
13	S4	S4	richtig	—	nein	63	25	25	richtig	—	nein
14	S1	S1	richtig	—	nein	64	T5	T5	richtig	—	nein
15	T9	T9	richtig	—	nein	65	T15	T15	richtig	—	nein
16	S3	S3	richtig	—	nein	66	S15	S15	richtig	—	nein
17	S12	S12	richtig	—	nein	67	D18	D18	richtig	—	nein
18	D7	0	falsch	—	nein	68	S14	S14	richtig	—	nein
19	S15	S15	richtig	—	nein	69	S14	S14	richtig	—	nein
20	S1	S1	richtig	—	nein	70	S11	S11	richtig	—	nein
21	S3	S3	richtig	—	nein	71	S5	S5	richtig	—	nein
22	S5	S5	richtig	—	nein	72	S10	S10	richtig	—	nein
23	25	25	richtig	—	nein	73	S19	S7	falsch	—	nein
24	S2	S2	richtig	—	nein	74	T20	T20	richtig	—	nein
25	S9	leer	keine	—	nein	75	S5	S5	richtig	—	nein
26	T6	leer	keine	—	nein	76	S15	S10	falsch	ja	nein
27	S13	S13	richtig	—	nein	77	S20	S20	richtig	—	nein
28	S14	S14	richtig	—	nein	78	D16	leer	keine	—	nein
29	T17	T17	richtig	—	nein	79	S10	S10	richtig	—	nein
30	S5	S5	richtig	—	nein	80	S12	S12	richtig	—	nein
31	S11	S11	richtig	—	nein	81	D1	D1	richtig	—	nein
32	S10	S10	richtig	—	nein	82	25	25	richtig	—	nein
33	S9	S9	richtig	—	nein	83	T17	T17	richtig	—	nein
34	D18	D18	richtig	—	nein	84	S13	leer	keine	—	nein
35	S2	S2	richtig	—	nein	85	S9	leer	keine	—	nein
36	S13	S13	richtig	—	nein	86	S5	S5	richtig	—	nein
37	S5	S5	richtig	—	nein	87	BULL	BULL	richtig	—	nein
38	BULL	BULL	richtig	—	nein	88	S10	S10	richtig	—	nein
39	S16	S16	richtig	—	nein	89	S20	S20	richtig	—	nein
40	S15	S15	richtig	—	nein	90	D15	leer	keine	—	nein
41	S20	S20	richtig	—	nein	91	S15	leer	keine	—	nein
42	S5	S5	richtig	—	nein	92	S12	S12	richtig	—	nein
43	S10	S10	richtig	—	nein	93	S14	S14	richtig	—	nein
44	D8	D8	richtig	—	nein	94	S17	S17	richtig	—	nein
45	S12	S12	richtig	—	nein	95	S1	S1	richtig	—	nein
46	T2	T2	richtig	—	nein	96	S12	S5	falsch	ja	nein
47	S10	S15	falsch	ja	nein	97	S15	S15	richtig	—	nein
48	S12	S12	richtig	—	nein	98	S14	S14	richtig	—	nein

Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt	Nr.	Wurf	Gewertet	Wertung	Grenze	Doppelt
49	25	25	richtig	—	nein	99	D4	D4	richtig	—	nein
50	T7	T7	richtig	—	nein	100	S8	S8	richtig	—	nein

Prüffolge 3 — Lichtereignisse und Dauerlicht, A15 · A16

Nr.	Ereignis	Erwartetes Licht	Beobachtetes Licht	Dauer	Korrekt
1	Überwurf	rot	rot	2500 ms	ja
2	Sieg	grün	grün	5000 ms	ja
3	Überwurf	rot	rot	2500 ms	ja
4	Überwurf	rot	rot	2500 ms	ja
5	Sieg	grün	grün	5000 ms	ja
6	Überwurf	rot	rot	2500 ms	ja
7	Sieg	grün	grün	5000 ms	ja
8	Überwurf	rot	rot	2500 ms	ja
9	Sieg	grün	grün	5000 ms	ja
10	Sieg	grün	grün	5000 ms	ja

Der Wechsel zwischen Vollweiss und Ruhezustand ist zehnmal geprüft und zehnmal richtig ausgeführt worden. Die Startsequenz mit Rot – Grün – Weiss ist ebenfalls zehnmal geprüft und zehnmal richtig ausgeführt worden. Nach jedem Lichtereignis schaltete das System in den Vollweissbetrieb zurück; sonst hätte die Dauer des Effekts nicht gemessen werden können.

Prüfung	Sollwert	Ergebnis
Dauerlicht im Spielbetrieb, A15	LED-Band leuchtet konstant weiss als Kamerabeleuchtung	über beide Wurfreihen konstant, Strombegrenzung aktiv

Prüffolge 4 — Ablesbarkeit aus Spielentfernung, A14

Abstand 2,37 m, Raumlicht eingeschaltet, Anzeige an ihrer Ständerposition, Ziffernhöhe 21 bis 22 mm.

Durchgang	Reststand Spieler 1	Reststand Spieler 2	Drei Wurfkacheln	Anzeige korrekt
1	145	25	S10 / D8 / 12	ja
2	65	174	S11 / 25 / T17	ja
3	285	456	S5 / BULL / S10	ja

14.6.11.7 Auswertung

Gegen den Sollwert

Grösse	Wert
Würfe gesamt	200
Davon richtig gewertet	180
Trefferquote	90 Prozent
Doppelwertungen	0 von 200 — der Nachweis zu A3
Lichtereignisse richtig	10 von 10
Dauerlicht im Spielbetrieb	über beide Wurfreihen konstant
Ablesbarkeit aus 2,37 m	3 von 3 Durchgängen richtig abgelesen

Die beiden Wurfreihen einzeln

Ergebnis der Wurfreihe	Wurfreihe 1	Wurfreihe 2	Beide
Würfe gesamt	100	100	200
Davon richtig gewertet	92	88	180
Davon falsch gewertet	5	8	13
Davon nicht erkannt	3	4	7
Fehlerereignisse	8	12	20
Davon Grenzfälle	4	4	8
Doppelwertungen	0	0	0

Aufgenommen sind nur die Grenzfälle, die falsch gewertet wurden. Die richtig gewerteten stehen nicht in der Zeile. Zieht man sie von den Fehlerereignissen ab, bleiben je Wurfreihe vier und acht Fehler, an denen sich im zweiten Prototyp etwas verbessern liesse. Ein Grenzfall selbst lässt sich nicht wegkorrigieren. Toleranzen bestehen.

Ein Fehlerereignis ist etwas anderes als ein abweichender Wurf: Folgen zwei Nichterkennungen aufeinander, zählen sie als ein Ereignis, weil der Spielfluss einmal unterbrochen wird. Wurfreihe 2 trägt deshalb 15 abweichende Würfe, aber 12 Fehlerereignisse; die drei Paare liegen in den Zeilen 25 und 26, 84 und 85 sowie 90 und 91.

Nach Ringen

Ring	Treffer	Davon richtig	Quote
Single	142	131	90,1 Prozent
Doppelring	23	15	65,2 Prozent
Dreifachring	22	21	95,5 Prozent
Bull und Bullseye	13	13	100 Prozent
Gesamt	200	180	90 Prozent

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A2	Zuordnung zu Segment und Ring, mindestens 80 Prozent	bestanden
A3	Das Ziehen der Darts erzeugt keine zusätzliche Wertung	bestanden
A14	Vollbild auf der gewählten Auflösung, Punktestände aus Abwurfdistanz ablesbar	bestanden
A15	Im Spielbetrieb leuchtet das LED-Band konstant weiss als Kamerabeleuchtung	bestanden
A16	Definierte Ereignisse lösen Farbeffekte aus, mindestens 8 von 10	bestanden

14.6.11.8 Ergebnis

Erfüllt. Von 200 gewerteten Würfen sind 180 richtig gewertet, das sind 90 Prozent. Kein Wurf wurde doppelt gewertet, alle zehn Lichtereignisse traten richtig ein, die Anzeige war aus 2,37 m in allen drei Durchgängen ablesbar und über 75 Minuten musste kein Spiel wegen eines Systemausfalls abgebrochen werden.

14.6.12 Prüfprotokoll P-07 — Dauerbetrieb und Akkubetrieb

14.6.12.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-07 — Verhalten über die Dauer: Drosselung, Chiptemperatur, Ruhezustand und Akkubetrieb
Gegenstand	Was sich erst über die Zeit zeigt. Geprüft wird nicht, ob die Anlage arbeitet, sondern ob sie es auch nach Stunden noch unvermindert tut: ob die Rechner in eine Schutzdrosselung laufen, wie warm ihre Chips werden, welche Last der Ruhezustand wirklich spart und wie lange das Akkumodul die Anzeigeeinheit trägt.
Zweck	Der Nachweis, dass die Betriebsbereitschaft nach K1 keine Momentaufnahme ist. Eine Anlage, die im Augenblick der Messung alle Sollwerte einhält und nach einer Stunde drosselt, ist nicht betriebsbereit.
Erfolgskriterium	K1 — «Der Hardware-Prototyp ist vollständig aufgebaut und betriebsbereit; alle drei Kameras, das Display und das LED-Band werden vom System angesteuert.» Dieses Protokoll trägt den Teil, der über die Dauer gilt.
Anforderungen	A23 — drei Kamerabilder gleichzeitig und zugleich ein Funkzugangspunkt, über die Dauer des Betriebs.
Sollwerte	`vcgencmd get_throttled` beider Rechner durchgehend `0x0` · Chiptemperatur unter Last unter 80 °C · kein Spielabbruch wegen eines Systemausfalls · Laufzeit des Akkumoduls im Spielbetrieb min. 2 stunden
Messtage	Dauerbetrieb im Nachweislauf: Montag, 19.10.2026. Dauerbetrieb der Strommessung: Samstag, 16.10.2026, erhoben in P-03. Ruhezustand: 19.10.2026
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

14.6.12.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
`vcgencmd get_throttled`	Abfrage des Drosselungsregisters auf beiden Rechnern, alle zehn Minuten	Drosselung, Unterspannung — als Bitmuster	ein Bit je Ereignis	Sagt nicht wie lange und nicht wie stark
`vcgencmd measure_temp`	Chiptemperatur beider Rechner, im selben Takt abgelesen	Temperatur des Halbleiters	0,1 °C	Chip-Temperatur
Systemlastanzeige der Erkennungseinheit	Prozessorlast im Spielbetrieb und im Ruhezustand	Last in Prozent über alle Kerne	1 Prozent	N.A
Stoppuhr	Laufzeit des Akkumodul	Zeit	1 s	—
Ladezustandsabfrage des Akkumoduls über I²C	Ladezustand in Prozent, alle 30 Minuten	Ladezustand	1 Prozent	—

14.6.12.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Aufbau	Ständermontage, in Betrieb genommen und unverändert über alle Läufe
Kühlung	serienmässige aktive Kühlung des Pi 5, Anzeigerechner ohne Lüfter
Raumtemperatur Start	26,7 °C
Belastung im Nachweislauf	laufender Spielbetrieb: drei Kameras, Erkennung, Konsensprüfung, LED-Ring auf Vollweiss mit aktivem Begrenzer, Funkzugangspunkt
Belastung im Ruhezustand	drei Kameras offen, Erkennung aus, LED-Ring gedimmt weiss
Stromversorgung der Anzeigeeinheit im Nachweislauf	Akkubetrieb und Ladebetrieb

14.6.12.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Anlage in Betrieb genommen und in den Spielbetrieb versetzt; der Nachweislauf über 200 Würfe begonnen.
2	Alle zehn Minuten `vcgencmd get_throttled` auf beiden Rechnern abgefragt und die Chiptemperatur abgelesen.
3	Über den ganzen Lauf mitgeführt, ob ein Spiel wegen eines Systemausfalls abgebrochen werden musste.
4	Am Ende des Laufs die Höchstwerte der Chiptemperatur beider Rechner festgehalten.
5	Während der Strommessung der Spielbetrieb über 30 Minuten gehalten und `vcgencmd get_throttled` am Ende abgefragt.
6	Vor der Absenkung der Bildrate Prozessorlast und Chiptemperatur im Ruhezustand und im Spielbetrieb abgelesen, danach dieselben Grössen erneut.
7	Akkulaufzeit der Anzeigeeinheit messen: vollgeladen starten, alle 15 Minuten den Ladezustand ablesen, bis zum Abschalten laufen lassen.

14.6.12.5 Messaufbau



Abbildung 1: Ausgabe von vcgencmd get_throttled und vcgencmd measure_temp



Abbildung 2: Ladezustandsanzeige des Akkumoduls

14.6.12.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Drosselung über 75 Minuten Spielbetrieb, A23

Alle zehn Minuten abgelesen, auf beiden Rechnern.

Ablesung	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min
`get_throttled` Erkennungseinheit	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`
`get_throttled` Anzeigeeinheit	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`	`0x0`

0x0 heisst: keine Drosselung und keine Unterspannung.

Prüffolge 2 — Chiptemperatur im selben Lauf, A23

Grösse	Sollwert	Höchstwert	Abstand
Chiptemperatur Erkennungseinheit	unter 80 °C	64,3 °C	15,7 K
Chiptemperatur Anzeigeeinheit	unter 80 °C	54,8 °C	25,2 K

Weitere Grösse	Wert
Raumtemperatur bei Beginn	26,7 °C
Gesamtdauer des Laufs	75 min
Spielabbruch wegen eines Systemausfalls	keiner, 0 mal

Festgehalten sind die Höchstwerte über den ganzen Lauf. Abgelesen wurde im Zehnminutentakt.

Prüffolge 3 — Drosselung über 30 Minuten Strommessbetrieb, A23

Ein zweiter Dauerbeleg, an einem anderen Tag und in einem anderen Aufbauzustand erhoben.

Grösse	Sollwert	Messwert	Erhoben in
Messdauer im Spielbetrieb	—	30 min	P-03
`get_throttled` am Ende der Dauer	`0x0`	`0x0`	P-03

Prüffolge 4 — Ruhezustand: Last und Temperatur vor und nach der Absenkung der Bildrate

Der Ruhezustand schaltete ursprünglich die Wertung ab, nicht die Bilderfassung. Die Last blieb deshalb fast unverändert und der Lüfter lief am ungenutzten Aufbau hoch. Die Bildrate der Erfassungsschleife ist daraufhin im Ruhezustand von 30 auf 5 Bilder je Sekunde abgesenkt worden.

Zustand	Prozessorlast	Chiptemperatur
Spielbetrieb	127 bis 230 %	—
Ruhezustand, vor der Absenkung	154 bis 180 %	65 bis 67 °C
Ruhezustand, nach der Absenkung	0 bis 145 %, im Mittel rund 100 %	63 bis 65 °C

Grösse	Wert
Bildrate der Erfassungsschleife im Ruhezustand	5 statt 30 Bilder je Sekunde
Obergrenze der Last	von 180 auf 145 Prozent, 35 Prozentpunkte tiefer
Chiptemperatur	2 K tiefer
Kameras	bleiben offen, die Zuordnung bleibt über die ganze Laufzeit bestehen
Dauer des Spielstarts	unverändert

Die Absenkung ist eine absichtliche Massnahme und nicht mit der Schutzdrosselung der Prüffolgen 1 und 3 zu verwechseln. Eine Schutzdrosselung ist in keinem Lauf aufgetreten.

Prüffolge 5 — Akkubetrieb der Anzeigeeinheit

Die Anzeigeeinheit hängt nicht am zentralen Netzteil, sondern an einem eigenen Akkumodul mit eigenem Ladegerät. Damit ist sie abnehmbar und nicht an den Aufbau gebunden.

Angabe	Wert
Modul	PiSugar 3 Plus, aufsteckbar auf den Anzeigerechner
Nennkapazität	5000 mAh, Herstellerangabe
Ausgang	5 V, höchstens 3,0 A, Herstellerangabe
Ladezustandsabfrage	über I²C, Adressen `0x57` und `0x68`

Nr.	Prüfung	Sollwert	Ergebnis
1	Ladezustand bei Beginn der Messung	vollgeladen	100%
2	Laufzeit im Spielbetrieb bis zum Abschalten	Min. 120 min	> 270 min
3	Ladezustand alle 15 Minuten abgelesen	Verlauf ohne Sprung	Verlauf ohne Sprung
4	Warnhinweis vor dem Abschalten	erscheint	erscheint
5	Reihenfolge beim Abschalten: Programm vor Bildschirm	ja	ja
6	Ladekabel dauerhaft gesteckt	startet die Einheit nicht	korrekt

Festgehaltene Messwerte Akkulaufzeit:

Nr.	Laufzeit	Ladezustand	Nr.	Laufzeit	Ladezustand	Nr.	Laufzeit	Ladezustand
1	15 min	100 %	7	105 min	84 %	13	195 min	72 %
2	30 min	98 %	8	120 min	82 %	14	210 min	69 %
3	45 min	94 %	9	135 min	80 %	15	225 min	64 %
4	60 min	91 %	10	150 min	79 %	16	240 min	62 %
5	75 min	90 %	11	165 min	76 %	17	255 min	58 %
6	90 min	87 %	12	180 min	74 %	18	270 min	57 %

Der Ladezustand wurde während 270 min alle 15 min überwacht. In dieser Zeit wurden laufend Einspieler und Zweispieler Spiele von 301 und 501 gespielt. Nachdem der Ladezustand nach gespielten 4 Stunden und 30 min, immer noch bei 57% stand, wurde Test zum Akkubetrieb beendet. Die Vorgabe von mindestens 120min konnten deutlich überschritten werden.
Die Überprüfung der der Warnhinweise erfolgte mit einem nur zu 15% geladenen Akku um Zeit zu sparen.

14.6.12.7 Auswertung

Gegen die Sollwerte

Grösse	Wert
Ablesungen von `get_throttled` im Nachweislauf	14, alle `0x0`
Ablesungen mit gesetztem Drosselungs- oder Unterspannungsbit	keine
Spielbetrieb unter Beobachtung, zusammengezählt	75 Minuten
Höchste Chiptemperatur beider Rechner	64,3 °C gegen Sollwert von 80 °C
Kleinster Abstand zum Sollwert	15,7 K an der Erkennungseinheit
Spielabbrüche wegen eines Systemausfalls	keiner
Laufzeit des Akkumoduls	> 270 min

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A23	Drei Kamerabilder gleichzeitig und zugleich ein Funkzugangspunkt	bestanden

Die Breite der Anlage, drei Kameras und Funkzugangspunkt gleichzeitig, ist im Gesamttest von P-01 nachgewiesen. Dieses Protokoll trägt die Dauer: dass derselbe Zustand 75 Minuten lang gehalten wird, ohne dass ein Rechner drosselt.

14.6.12.8 Ergebnis

Erfüllt für den Dauerbetrieb und den Akkubetrieb.
Über 75 Minuten Spielbetrieb. Keine Drosselung und keine Unterspannung ist aufgetreten, kein Spiel wurde wegen eines Systemausfalls abgebrochen und die höchste gemessene Chiptemperatur liegt 15,7 K unter dem Sollwert. Damit hält die Betriebsbereitschaft nach K1 auch über die Dauer und A23 in der Zeit belegt. Der Akubetrieb übertrifft die Anforderung bei weitem. Nach einer Laufzeit von über 4.5 Stunden, lag der Ladezustand weiterhin bei über 50%. Warnhinweise wurden korrekt angezeigt und ein gestecktes Ladekabel startet Microcomputer nicht automatische.
Für Prototyp 02 soll ein direkt auf dem Display sichtbarer Ladezustand überprüft werden.

14.6.13 Prüfprotokoll P-08 — Automatisierter Testbestand

14.6.13.1 Kopf

Angabe	Wert
Bezeichnung	P-08 — Lauf des automatisierten Testbestands beider Anwendungen
Gegenstand	Der Quelltext der beiden Anwendungen: das Hauptprogramm der Erkennungseinheit und die Anwendung der Anzeigeeinheit. Geprüft werden die Regeln, nach denen gewertet und gespielt wird, nicht die Geräte, an denen es geschieht.
Zweck	Der Nachweis, dass die Spiellogik regelkonform arbeitet — Überwurf, Sieg, Punktestand, Korrektur — und dass eine Änderung am Quelltext keine dieser Regeln stillschweigend verletzt.
Erfolgskriterium	K3 — «Die Varianten 501 und 301 laufen für ein bis zwei Spieler regelkonform einschliesslich Überwurf- und Double-Out-Regel; der Punktestand wird über ein vollständiges Testspiel hinweg korrekt geführt.»
Anforderungen	A7 — Überwurf stellt den Reststand der Aufnahme zurück und beendet sie regelkonform; Sieg nur regelkonform. A12 — Korrekturen wirken regelkonform: Ein durch Korrektur entstehender oder entfallender Überwurf beziehungsweise Sieg wird richtig behandelt.
Sollwert	Die Regeln, die K3 nennt, sind durch Prüffälle abgedeckt und der Bestand läuft bei jeder Änderung am Quelltext erneut.
Umfang	487 Prüffälle in 28 Testdateien
Systemstand	Hauptprogramm `ccaf7c2`, Anzeige `d4bff54`

14.6.13.2 Prüfmittel

Messmittel	Art und Einsatz	Messgrössen	Auflösung	Bekannte Grenzen
Testrahmen `pytest`	Sammelt die Prüffälle aus den Testdateien und führt sie aus. Während der Entwicklung bei jeder Änderung	Zahl der Prüffälle je Datei	ein Prüffall	Er prüft, was in den Prüffällen steht. eine Zeilenabdeckung des Quelltextes wird weder gemessen noch behauptet
Entwicklungsrechner	Führt den Lauf aus, ohne die Anlage	—	—	Der Lauf sagt nichts über die Hardware. Was an den Geräten zu prüfen ist, steht in P-01 bis P-06

14.6.13.3 Prüfbedingungen

Angabe	Wert
Kamera angeschlossen	nein — der Bestand läuft ohne Kamera
Anzeige angeschlossen	nein
Aufbau in Betrieb	nein
Arbeitsverzeichnis	ohne offene Änderungen
Aufruf	`pytest` im Wurzelverzeichnis der jeweiligen Anwendung

14.6.13.4 Prüfablauf

Schritt	Handlung
1	Systemstand geprüft: Arbeitsverzeichnis ohne offene Änderungen.
2	Testbestand der Erkennungseinheit gesammelt und ausgeführt.
3	Testbestand der Anzeigeeinheit gesammelt und ausgeführt.
4	Zahl der Prüffälle je Testdatei und je Anwendung ausgezählt.
5	Die Ausgabe eines Laufs als Bildschirmabbildung gesichert.

14.6.13.5 Messaufbau

Nicht anwendbar für automatisierte Tests.

14.6.13.6 Messwerte

Prüffolge 1 — Testbestand der Erkennungseinheit, A7 · A12

Testdatei	Prüffälle	Gegenstand
`test_board_model.py`	8	Rechenmodell der Scheibe: Segmente, Ringe und ihre Grenzen
`test_bridge.py`	27	Brückendienst über TCP und JSON, ohne Kamera und ohne Anzeige
`test_bust_end.py`	7	Überwurf und vorzeitiger Sieg beenden die Aufnahme wie eine volle Runde
`test_calibration_profiles.py`	18	Kalibrierprofile: Laden, Prüfen und Auswahl
`test_camera_diagnostics.py`	5	Protokollierung der Kamerazustände, je Kamera
`test_camera_mapping.py`	5	Prüfung der Kamerazuordnung
`test_checkout.py`	7	Tabelle der Auscheckvorschläge
`test_consensus.py`	10	Konsensprüfung über die drei Kameras
`test_dart_detection_config.py`	1	Einstellungen der Darterkennung
`test_detection_camera_overrides.py`	8	Übersteuerung der Erkennungswerte je Kamera
`test_game.py`	53	Spiellogik X01: Punktestand, Runden, Spielerwechsel — ohne Kamera
`test_game_start.py`	16	Gesicherter Spielstart aus dem Ruhezustand
`test_led_control.py`	33	Lichtereignisse über WLED und ihre Kopplung an die Erkennung
`test_lens_intrinsics.py`	2	Linsenkennwerte der Kameras
`test_main_logging.py`	2	Protokollstufe über den Schalter `--debug`
`test_main_startup.py`	1	Durchlauf des Programmstarts bis zum Öffnen der Kameras
`test_recompute_calibration.py`	6	Neuberechnung der Kalibrierung
`test_removal_settle.py`	9	Beruhigungszeit nach dem Entfernen der Darts
`test_scoring.py`	48	Wertung: Zuordnung zu Segment und Ring, Punktzahl
`test_shutdown.py`	18	Ausschaltweg über den Brückendienst
`test_standby_fps.py`	9	Bildratenabsenkung im Ruhezustand und Leeren der Puffer
`test_undistort_coordinate_system.py`	6	Kalibrierung und Betrieb teilen ein Entzerrungskoordinatensystem
zusammen	299	22 Dateien

Prüffolge 2 — Testbestand der Anzeigeeinheit, A12

Testdatei	Prüffälle	Gegenstand
`test_bridge_client.py`	11	Adressliste des Brückenclients
`test_commands.py`	8	Menüauswahl und Befehlsargumente, ohne Qt-Ereignisschleife
`test_game_start.py`	33	Spielstart über den Ruhezustand der Erkennungseinheit
`test_game_view.py`	93	Spielansicht und Seitenmasse — braucht PyQt6
`test_line_protocol.py`	4	Zeilenprotokoll des Clients: Zusammensetzen und Verwerfen
`test_shutdown.py`	39	Ausschaltweg der Anzeigeanwendung
zusammen	188	6 Dateien

14.6.13.7 Auswertung

Gegen den Sollwert

Grösse	Wert
Prüffälle gesamt	487
Davon Erkennungseinheit	299 in 22 Testdateien
Davon Anzeigeeinheit	188 in 6 Testdateien
Testdateien gesamt	28
Wann der Bestand läuft	bei jeder Änderung am Quelltext

Anforderungstabelle

Anforderung	Was sie verlangt	Bewertung
A7	Überwurf stellt den Reststand der Aufnahme zurück und beendet sie regelkonform; Sieg nur regelkonform	bestanden
A12	Korrekturen wirken regelkonform: Ein durch Korrektur entstehender oder entfallender Überwurf oder Sieg wird richtig behandelt	bestanden

Die Wirkung derselben Regeln am Gerät steht in P-05, Prüffolge 4, Fälle 5 bis 7 — dieselbe Anforderung auf zwei Wegen, einmal im Quelltext und einmal unter dem Finger.

14.6.13.8 Ergebnis

Erfüllt. Die Regeln, auf denen K3 ruht — Punktestand, Runden und Spielerwechsel, Überwurf und Sieg, die Wirkung einer Korrektur — sind in 487 Prüffällen festgehalten, verteilt auf 28 Testdateien. Der Bestand ist während der ganzen Entwicklung eingesetzt worden und läuft bei jeder Änderung am Quelltext erneut: er weist damit nicht das Ergebnis eines einzelnen Tages aus, sondern dass keine Änderung eine dieser Regeln stillschweigend verletzen konnte.

14.7 Befehlsreferenz

Diese Referenz ist während der Arbeit entstanden und im Betrieb benutzt worden. Sie hält fest, womit die Anlage gestartet, beobachtet, gemessen und gesichert wird. Gespielt wird ausschliesslich über das Touch-Display. Alles hier Aufgeführte betrifft Entwicklung, Messung und Wartung.

14.7.1 Grundregeln

- Am Laptop kein `&&` verketten — die dortige Eingabeaufforderung kennt den Operator nicht. Auf den Kleinrechnern funktioniert er.
- Nach jedem `scp` auf den Kleinrechner: `chmod -R u+w <Zielordner>` — sonst bleiben die Dateien schreibgeschützt.
- Die Konfiguration wird nur beim Programmstart gelesen. Nach jeder Änderung an `board.yaml` die Anwendung neu starten.
- Änderungen immer im Quelltextarchiv machen und von dort aufspielen, nie nur auf dem Gerät — sonst überschreibt der nächste Abgleich sie.
- Immer über die Adresse verbinden, nie über einen Namen. Die Namensauflösung ist in beiden Netzen unzuverlässig.

14.7.2 Adressen

Die Endziffer eines Geräts ist in beiden Netzen dieselbe.

Gerät	Heimnetz	Eigenes Netz «DartVision»
Erkennungseinheit (Pi 5)	`192.168.0.22`	`192.168.5.1` (Zugangspunkt)
Anzeigeeinheit (Pi 3 B+)	`192.168.0.25`	`192.168.5.25`
Lichtcontroller	`192.168.0.21`	`192.168.5.21`
Router	`192.168.0.254`	—
übrige Geräte	—	`192.168.5.x` nach Zuteilung

Die Adresse des Lichtcontrollers ist im Heimnetz fest in seinem eigenen Profil hinterlegt, im eigenen Netz über eine feste Zuteilung anhand der Hardware-Kennung.

14.7.3 Verbinden

```
ssh timo-pi5@192.168.0.22          # Erkennungseinheit, Heimnetz
ssh timo-pi3@192.168.0.25          # Anzeigeeinheit, Heimnetz
ssh timo-pi5@192.168.5.1           # Erkennungseinheit, eigenes Netz
ssh timo-pi3@192.168.5.25          # Anzeigeeinheit, eigenes Netz
```

Die Erkennungseinheit hängt beim Entwickeln in beiden Netzen und ist damit immer das Sprungbrett. Ist die Anzeigeeinheit vom Laptop aus nicht erreichbar, führt der Weg über sie:

```
ssh timo-pi3@192.168.5.25          # von der Erkennungseinheit aus
```

Bildschirmzugriff über eine Fernwartungssitzung auf dieselbe Adresse. Im eigenen Netz ist sie spürbar langsam, weil das Kamerabild als Videostrom über die Funkstrecke läuft; die Erkennung ist davon nicht betroffen.

14.7.4 Ein- und Ausschalten

Gerät	Einschalten
Erkennungseinheit	Kippschalter
Anzeigeeinheit	Ladekabel am Akkumodul kurz ziehen und einstecken, oder Druckknopf am Modul

Der Schiebeschalter am Akkumodul bleibt dauerhaft auf Ein — er ist ein Trennschalter für Transport und Lagerung, kein Betriebsschalter. Das Modul löst den Start an der Flanke aus; ein dauerhaft gestecktes Kabel startet nichts.
Nach dem Hochfahren steht die Anlage im Ruhezustand: Licht gedimmt weiss, Erkennung aus, Bildrate abgesenkt. Erst der Spielstart über das Display versetzt sie in den Spielbetrieb.
Ausschalten über das Display: Menü, Ein-/Aus-Symbol unten rechts, Rückfrage bestätigen. Der Ablauf fährt zuerst die Erkennungseinheit herunter, dann die Anzeigeeinheit; der Lichtring wird dabei ausgeschaltet. Das Ladekabel darf gesteckt bleiben. Antwortet die Erkennungseinheit nicht, meldet die Rückfrage das und die Anzeigeeinheit lässt sich trotzdem herunterfahren.
Neustart über das Display: Schaltfläche links neben dem Ein-/Aus-Symbol, gleicher Ablauf. Intern wird `shutdown -r now` verwendet und nicht `/sbin/reboot` — Ersteres ist von der bestehenden Berechtigungsregel abgedeckt und braucht keine zweite.
Rückfallebene über die Fernverbindung:

```
sudo shutdown -h now
```

Die Verbindung bricht sofort ab. Zehn Sekunden warten, bis die grüne Betriebsanzeige dauerhaft aus ist. Erst dann den Kippschalter.

14.7.5 Anwendungen starten und beobachten

Beide Anwendungen laufen als Benutzerdienst und starten beim Hochfahren von selbst. Für den Betrieb ist kein Start von Hand nötig.
Erkennungseinheit:

```
systemctl --user status dartvision              # laeuft der Dienst?
systemctl --user restart dartvision             # nach jedem Aufspielen
systemctl --user stop dartvision                # fuer Laeufe im Vordergrund
systemctl --user start dartvision
journalctl --user -u dartvision -f              # Protokoll mitlesen
tail -f ~/dartvision.log
systemctl --user show dartvision -p NRestarts   # Neustarts seit dem Hochfahren
```

Lauf im Vordergrund, mit sichtbarer Ausgabe — vorher den Dienst anhalten:

```
systemctl --user stop dartvision
cd ~/DartVision_cv
DISPLAY=:0 python3 src/main.py
```

`systemctl --user stop` schaltet den Lichtring nicht aus — er bleibt im letzten Zustand stehen. Das Ausschalten über das Display tut es; zwischenzeitlich hilft der Aufruf aus 13.7.12.

Im Ruhezustand läuft die Bilderfassung gedrosselt, mit fünf statt dreissig Bildern je Sekunde. Das Vorschaubild ruckelt dort entsprechend; das ist beabsichtigt.
Anzeigeeinheit:

```
systemctl --user status dartvision-display
systemctl --user restart dartvision-display       # nach jedem Aufspielen
systemctl --user stop dartvision-display
systemctl --user start dartvision-display
tail -f ~/display.log
```

Lauf im Vordergrund, ebenfalls nach dem Anhalten des Dienstes:

```
systemctl --user stop dartvision-display
cd ~/ DartVision_display
DISPLAY=:0 python3 main.py --fullscreen
```

Der frühere Autostart-Eintrag liegt unter geändertem Namen und ist nicht mehr aktiv.

14.7.6 Aufrufschalter

Erkennungseinheit, `src/main.py`:

Schalter	Wirkung und was ohne Angabe gilt
`--config PFAD`	Pfad zur Kamerakonfiguration; ohne Angabe `config/cameras.yaml`
`--game 301 · --game 501`	Spielart; ohne Angabe `501`
`--players 1 · --players 2`	Zahl der Spieler; ohne Angabe zwei
`--no-double-out`	Abschlussregel abschalten; ohne Angabe ist Double-Out ein
`--names "Ann,Bob"`	Spielernamen, durch Komma getrennt; ohne Angabe leer
`--start-score N`	Reststand beider Spieler setzen, für Überwurf- und Ausschecktests; ohne Angabe gilt der Wert der Spielart
`--bridge-port N`	Port der Brücke zur Anzeige; ohne Angabe `8765`
`--no-bridge`	ohne Brücke starten, für Läufe ohne Netz
`--background-key TASTE`	Taste für das Hintergrundbild; ohne Angabe `b`
`--debug`	ausführliches Protokoll, etwa die einzelnen Verbindungsversuche zum Lichtcontroller

`--start-score` ist für Prüfungen am Regelwerk der nützlichste Schalter: Ein Reststand von 40 führt mit zwei Würfen in jeden Überwurf- und jeden Abschlussfall.
Anzeigeeinheit, `main.py`:

Schalter	Wirkung und was ohne Angabe gilt
`--fullscreen`	Vollbild für das Touch-Display; ohne Angabe ein Fenster
`--host ADRESSE`	Adresse der Brücke, mehrfach angebbar; ohne Angabe wird `192.168.0.22` probiert, dann `192.168.5.1`
`--port N`	Port der Brücke; ohne Angabe `8765`
`--demo`	eingebaute Beispieldaten statt der Brücke
`--smoke-test`	Oberfläche kurz öffnen und selbsttätig schliessen, um den Start zu prüfen
`--debug`	auch die einzelnen gescheiterten Verbindungsversuche protokollieren

```
DISPLAY=:0 python3 main.py --fullscreen --host 192.168.5.1   # feste Adresse, nur fuer Tests
```

14.7.7 Tastenbelegung im Kamerafenster

Sechzehn Tasten, alle Entwicklungs- und Prüfhilfen. Im Spielbetrieb wird keine davon gebraucht. Eingriff in das Spiel:

Taste	Wirkung
`g`	neues Spiel — ohne Kameraprüfung, siehe Warnung unten
`m`	Fehlwurf eintragen
`u`	letzten gewerteten Wurf zurücknehmen
`w`	Aufnahme abschliessen, Spieler wechseln
`e`	Aufnahme beenden, auf das Entfernen warten
`n`	laufenden Wurf zurücksetzen

> `w` und `e` werden leicht verwechselt: `w` schliesst die Aufnahme in der Spiellogik ab, `e` versetzt die Erkennung in die Entfernungsphase. Im Normalbetrieb läuft beides nacheinander von selbst.

Eingriff in die Erkennung:

Taste	Wirkung
`b`	Hintergrundbild neu setzen — nur bei leerem Board und im Ruhezustand, siehe Warnung
`d`	Erkennung ein/aus
`1`	Wertung schon mit einer Kamera zulassen — Prüfbetrieb
`2`	Wertung erst ab zwei Kameras — Normalbetrieb
`[`	geforderte Zahl stabiler Bilder um eins senken
`]`	geforderte Zahl stabiler Bilder um eins erhöhen

Die Taste für das Hintergrundbild lässt sich über `--background-key` ändern. `1`, `2` und die beiden Klammern wirken nur für den laufenden Lauf; in der Konfigurationsdatei ändert sich nichts.
Aufzeichnen und Beenden:

Taste	Wirkung
`c`	aktuelle Kamerabilder als Referenzaufnahmen ablegen
`f`	angezeigte Fenster als Bilddateien ablegen

Taste	Wirkung
v	Debuganzeige weiterschalten
q	beenden (Protokollpuffer werden geleert)

Warnung zu b: Nur bei wirklich leerem Board drücken und nicht während der Entfernungsphase — das setzt auch die Referenz der Entfernungserkennung und kann das System festsetzen.

Warnung zu g: Die Taste startet ein Spiel unmittelbar und umgeht die Kameraprüfung. Als Entwicklungshilfe gedacht. Eine vertauschte Kamerazuordnung erzeugt gespiegelte Punktzahlen ohne Fehlermeldung — für den regulären Betrieb immer über das Display starten.

Eine Messreihe immer mit q beenden, nicht über das Schliessen des Fensters: Nur so werden die Protokollpuffer geschrieben.

14.7.8 Kameras und Kalibrierung

Kamerazuordnung prüfen:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 scripts/check_camera_mapping.py
```

Das Skript setzt selbst Vollweiss und wartet die Beruhigungszeit ab. Sollwerte: Meldung «Zuordnung KORREKT», Diagonalwerte über 0,8, deutlicher Abstand zur nächstbesten Zuordnung. Niedrige Werte bei korrekter Zuordnung deuten auf veränderte Beleuchtung oder Gegenstände im Bild, nicht auf eine Vertauschung — verglichen wird der gesamte Bildinhalt.
Dieselbe Prüfung läuft seit dem geprüften Spielstart bei jedem Start über das Display; der Aufruf von Hand dient der Fehlersuche.
Vorhandene Kameraanschlüsse abtasten:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 src/check_cameras.py
```

Zeigt, welche Anschlüsse ein Bild liefern. Welcher Anschluss zu welchem Programmkanal gehört, beantwortet er nicht — das tut die Zuordnungsprüfung.
Kalibrierung aus den gespeicherten Klickpunkten neu rechnen:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 scripts/recompute_calibration.py
```

Die Klickpunkte bleiben unberührt; neu gerechnet werden Abbildung und Feldumrisse.

`config/calibration.yaml` liegt im Quelltextarchiv. Die Sicherung vor der Berichtigung der Sollvorgaben liegt daneben, gehört aber nicht zum Archiv — ausserhalb sichern, sonst beim nächsten Aufräumen verloren.

Erkennung auf gespeicherten Bildern nachspielen:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 scripts/replay_detection.py \
    --samples-dir data/samples --output-dir /tmp/replay
```

Mit `--show` werden die Zwischenbilder zusätzlich angezeigt. Das ist der einzige Weg, eine Änderung an der Erkennung gegen denselben Bildbestand zu prüfen statt gegen neu geworfene Darts.

14.7.9 Messreihen aufzeichnen

```
cd ~/ DartVision_cv
mkdir -p data/logs/archiv/reiheNN
mv data/logs/debug_*.csv data/logs/archiv/reiheNN/
python3 scripts/check_camera_mapping.py
DISPLAY=:0 python3 src/main.py
```

Mit `q` beenden, damit die Protokollpuffer sicher geleert werden.

Datei	Inhalt
`data/logs/debug_throws.csv`	eine Zeile je Wertungsereignis, mit Zustand und Grund
`data/logs/debug_detection.csv`	je Kamera und Bild: Fläche, Konturen, Konfidenz, Ablehnungsgrund
`data/logs/debug_cameras.csv`	je Kamera und Wertung: Einzelschätzung, Konturlänge, Gewicht, Residuum

> Die Spalte `camera_ids` enthält Kommas. Auswertungen, die auf Kommas trennen, verschieben dadurch alle folgenden Felder — immer einen Leser verwenden, der Anführungszeichen beachtet.

Zeitstempel sind in Weltzeit; die Schweizer Sommerzeit liegt zwei Stunden davor.
Messdaten auf den Laptop holen:

```
scp timo-pi5@192.168.0.22:~/ DartVision_cv/data/logs/debug_throws.csv .\messung.csv
```

14.7.10 Messreihen auswerten

Alle Wertungen der Reihe nach:

```
cd ~/ DartVision_cv && python3 -c "
import csv
from collections import Counter
th = list(csv.DictReader(open('data/logs/debug_throws.csv')))
sc = [r for r in th if r['state'] == 'scored']
print(f'=== {len(sc)} Wertungen ===')
for i, r in enumerate(sc, 1):
    print(f\"{i:>3} {(r['final_segment'] or '-'):>3}-{(r['final_ring'] or '-'):<12} \"
          f\"r={float(r['radius_norm']):.4f} w={float(r['angle_deg']):7.2f} \"
          f\"cams={r['camera_count']} {r['scoring_mode']}\")
print(f\"Verfahren: {dict(Counter(r['scoring_mode'] for r in sc))}\")
print(f\"Ringe: {dict(Counter(r['final_ring'] for r in sc))}\")
"
```

Geworfene Folge gegen die Wertungen abgleichen:

```
cd ~/ DartVision_cv && python3 -c "
import csv
SOLL = '25,5,18,16,T6,7'.split(',')      # eigene Wurffolge eintragen
th = [r for r in csv.DictReader(open('data/logs/debug_throws.csv'))
      if r['state'] == 'scored']
def kurz(r):
    seg, ring = r['final_segment'] or '', r['final_ring'] or ''
    if 'bull' in ring: return '25' if 'outer' in ring else '50'
    if ring == 'miss': return 'MISS'
    return {'double': 'D', 'triple': 'T'}.get(ring, '') + seg
ok = 0
for i, (s, r) in enumerate(zip(SOLL, th), 1):
    v = kurz(r); ok += s == v
    print(f'{i:>3} soll={s:<5} ist={v:<6} {\"OK\" if s == v else \"FEHLER\"}')
print(f'{ok}/{len(SOLL)} = {100 * ok / len(SOLL):.0f}%')
"
```

Fehlt ein Eintrag, verschiebt sich ab dort alles um eine Position und alle folgenden Zeilen zeigen Abweichungen, die keine sind. Immer mit den eigenen Notizen abgleichen.

Zustandswechsel verfolgen, zur Fehlersuche bei Hängenbleiben:

```
cd ~/ DartVision_cv && python3 -c "
import csv
th = list(csv.DictReader(open('data/logs/debug_throws.csv')))
prev = None
for r in th[-60:]:
    if r['state'] != prev:
        print(f\"--> {r['state']}\")
        prev = r['state']
    if r['state'] == 'scored':
        print(f\"    {(r['final_segment'] or '-')}-{(r['final_ring'] or '-')}\")
"
```

Ablehnungsgründe je Kamera:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 scripts/analyze_detection_log.py
```

Ein Median der veränderten Fläche von null bei abgelehnten Zeilen ist normal — das sind Bilder ohne jede Veränderung und der Ablehnungsgrund ist dort nur die Sammelkategorie für «kein Dart im Bild».
Übereinstimmung der drei Kameras:

```
cd ~/ DartVision_cv
python3 scripts/analyze_camera_agreement.py
```

Verbindet die Kameradiagnose mit den Wertungen und zeigt, wo die Einzelschätzungen auseinanderliegen. Dieses Werkzeug hat die Untersuchung getragen, in der sich drei Kameras als schlechter erwiesen als zwei.

14.7.11 Netzwerk

Die Kenngrössen des eigenen Netzes stehen nicht in einer Datei, sondern im Verbindungsprofil des Zugangspunkts.

Grösse	Wert
Netzwerkname	DartVision
Sicherheit	WPA2-Personal, Verschlüsselung AES
Frequenzband	2,4 GHz
Funkkanal	6, fest eingestellt
Kanalbreite	automatisch
Funkmodul	äusseres USB-Modul mit RTL8822BU, Gerätename wlan1
Stromsparmodus des Moduls	abgeschaltet
Verbindungsprofil	dartvision-ap, fest an wlan1 gebunden, startet selbsttätig
Adresse des Zugangspunkts	192.168.5.1
Adressbereich	192.168.5.0/24
Adressvergabe	durch die Netzverwaltung selbst, Betriebsart «geteilt»
Zweite Adressfamilie	auf dieser Schnittstelle abgeschaltet

Die Netzkonfiguration liegt in keinem Quelltextarchiv, sondern allein auf dem Gerät und im Kartenabbild:

Datei	Inhalt
/etc/NetworkManager/system-connections/dartvision-ap.nmconnection	das Profil des Zugangspunkts
/etc/NetworkManager/dnsmasq-shared.d/dartvision-leds.conf	die festen Adresszuteilungen beider Teilnehmer

Zustand prüfen:

```
nmcli -t -f NAME,TYPE,DEVICE,AUTOCONNECT,AUTOCONNECT-PRIORITY con show
nmcli -t -f NAME,DEVICE,STATE con show --active
ip -br addr
ip route
iw dev wlan0 link
iw dev wlan1 info
```

Ohne `-t` blättert die Ausgabe seitenweise; `q` beendet den Blätterer.

Diese beiden Aufrufe geben die Kenngrössen aus. Der erste zeigt, was eingestellt ist, der zweite, was das Modul tatsächlich tut.

```
nmcli -f 802-11-wireless con show dartvision-ap
802-11-wireless.ssid:            DartVision
802-11-wireless.mode:            ap
802-11-wireless.band:            bg
802-11-wireless.channel:         6
802-11-wireless.hidden:          no
802-11-wireless.powersave:       2 (disable)
802-11-wireless.channel-width:   0 (auto)
iw dev wlan1 info
Interface wlan1
        ifindex 4
        addr 90:de:80:a4:30:fc
        type managed
        wiphy 2
        txpower 20.00 dBm
```

Steht bei «type» der Wert managed, läuft der Zugangspunkt gerade nicht; im Betrieb steht dort AP und darunter der Kanal. Die Adresse unter «addr» ist dieselbe, die das Profil als zuletzt verwendete Kennung führt — daran ist zu erkennen, dass das eigene Netz auf dem äusseren Modul läuft und nicht auf dem des Rechners.

Eigenes Netz ein- und ausschalten:

```
sudo nmcli con up dartvision-ap
sudo nmcli con down dartvision-ap
```

Angemeldete Geräte und vergebene Adressen:

```
iw dev wlan1 station dump | grep -E "Station|signal:"
sudo journalctl -n 20 --no-pager | grep -i dhcp
```

Die festen Adresszuteilungen stehen in einer eigenen Konfigurationsdatei des Zugangspunkts. Nach einer Änderung den Zugangspunkt einmal ab- und wieder anmelden.
Anzeigeeinheit zwischen den Netzen umschalten:

```
sudo nmcli con up dartvision-client               # in das eigene Netz
sudo nmcli con up netplan-wlan0-WN-51E040         # zurueck in das Heimnetz
```

Beide Befehle brechen die laufende Fernverbindung ab — das ist normal.
Stromsparmodus des Funkmoduls:

```
iw dev wlan0 get power_save
sudo nmcli con modify netplan-wlan0-WN-51E040 802-11-wireless.powersave 2
sudo nmcli con up netplan-wlan0-WN-51E040
```

Sollwert `off`. Bei aktivem Stromsparmodus antwortet der Lichtcontroller nach längeren Pausen erst nach über einer Sekunde. Prüfung, die ihn tatsächlich findet:

```
sleep 300
URL="http://192.168.0.21/win&A=255&R=255&G=255&B=255"
time curl -s -o /dev/null --max-time 5 "$URL"
```

> Sollwert unter 0,3 s. Eine schnelle Folge von Zugriffen zeigt das Problem nicht — der erste Zugriff weckt das Funkmodul, alle weiteren treffen es wach an.

Störungssuche:

```
journalctl --list-boots
sudo journalctl -u NetworkManager -n 40 --no-pager \
  | grep -iE "wlan|disconnect|deauth|timeout"
sudo journalctl -n 40 --no-pager | grep -iE "auth|assoc|dhcp"
systemctl list-timers --all --no-pager
vcgencmd get_throttled; vcgencmd measure_temp
```

`atq` gibt es auf der Erkennungseinheit nicht — für geplante Aufgaben `systemctl list-timers --all` verwenden. Ein Rückgabewert `0x0` der Drosselungsabfrage heisst: seit dem Hochfahren weder Unterspannung noch Überhitzung.

Dauerbeobachtung der Netzverbindung:

```
nohup bash -c 'while true; do
  echo "$(date -Is) $(ping -c1 -W2 192.168.0.254 >/dev/null && echo OK || echo FAIL)"
  sleep 60
done' > ~/netz_wachlog.txt 2>&1 &

grep -c FAIL ~/netz_wachlog.txt
```

Laptop mit dem eigenen Netz verbinden: Der übliche Verbindungsdialog schaltet auf ein anderes Anmeldeverfahren um und meldet, die PIN sei nicht korrekt, ohne dass der Versuch je bei der Anlage ankommt — deshalb steht in deren Protokoll auch nichts. Profil von Hand anlegen: Netzwerkname `DartVision`, Sicherheitstyp WPA2-Personal, Verschlüsselung AES.

```
netsh wlan show profiles
netsh wlan delete profile name="DartVision"      # als Administrator
```

14.7.12 Lichtcontroller

```
curl -s "http://192.168.0.21/win&A=255&R=255&G=255&B=255"      # Vollweiss
curl -s "http://192.168.0.21/win&A=64&R=255&G=255&B=255"       # Ruhezustand
curl -s "http://192.168.0.21/win&A=255&R=255&G=0&B=0"          # Rot
curl -s "http://192.168.0.21/win&A=255&R=0&G=255&B=0"          # Gruen
curl -s "http://192.168.0.21/json/state" | head -c 300         # Zustand
```

Im eigenen Netz dieselben Aufrufe mit `192.168.5.21`. Der Wert hinter `A` ist die Helligkeit von 0 bis 255; der Ruhezustand verwendet 64.
Erreichbarkeit in beiden Netzen:

```
curl -s -o /dev/null -w "heim %{http_code}\n" --max-time 3 http://192.168.0.21/
curl -s -o /dev/null -w "eigen %{http_code}\n" --max-time 3 http://192.168.5.21/
```

Die Weboberfläche immer unmittelbar über die Adresse aufrufen, nicht über die Suchfunktion einer App — mit fester Adresse findet die Suche den Controller nicht.

Findet der Controller gar kein Netz, spannt er selbst einen Zugangspunkt auf. Das ist der Rückweg, wenn seine Netzkonfiguration unbrauchbar wird.

14.7.13 Selbststart als Benutzerdienst

Gerät	Dienstdatei
Erkennungseinheit	`~/.config/systemd/user/dartvision.service`
Anzeigeeinheit	`~/.config/systemd/user/dartvision-display.service`

> Diese Dateien liegen in keinem Quelltextarchiv. Sie sind Systemzustand und werden nur über das Abbild der Speicherkarte gesichert.

```
Type=simple
WorkingDirectory=/home/timo-pi5/ DartVision_cv
Environment=DISPLAY=:0
ExecStartPre=/bin/bash -c 'for i in $(seq 1 60); do [ -S /tmp/.X11-unix/X0 ] && exit 0; slee
p 1; done; exit 1'
ExecStart=/usr/bin/python3 src/main.py
Restart=on-failure
RestartSec=10
StandardOutput=append:/home/timo-pi5/dartvision.log
StandardError=append:/home/timo-pi5/dartvision.log
WantedBy=default.target
```

`ExecStartPre` wartet bis zu sechzig Sekunden auf den Anschluss der Bildschirmsitzung — nötig, weil der dafür vorgesehene Anknüpfungspunkt des Systems auf diesen Geräten nicht aktiv ist.
`Restart=on-failure` startet nach einem Absturz neu. Ein geordnetes Beenden — über `q`, über das Display oder über das Anhalten des Dienstes — gilt nicht als Fehler und löst keinen Neustart aus. Ohne diese Unterscheidung liesse sich die Anlage über das Display nie ausschalten.

Einrichtung, einmalig:

```
systemctl --user daemon-reload
systemctl --user enable dartvision
sudo loginctl enable-linger timo-pi5
```

`linger` sorgt dafür, dass der Benutzerdienst unabhängig von einer Anmeldung läuft.
Prüfen:

```
systemctl --user status dartvision --no-pager
systemctl --user show dartvision -p NRestarts
loginctl show-user timo-pi5 --property=Linger
```

`NRestarts=0` heisst: kein Absturz seit dem Hochfahren. Der Zähler wird bei jedem Neustart des Geräts zurückgesetzt.

14.7.14 Aufspielen und Versionsverwaltung

Vor jedem Aufspielen laufen die Prüffälle, vor jeder beauftragten Änderung wird der geprüfte Stand markiert. Die Markierung ist der Rückfallpunkt.
Erkennungseinheit, am Laptop im Quelltextarchiv:

```
python -m pytest -q
git add -A
git commit -m "Beschreibung"
git tag vX.Y-beschreibung
scp -r src config scripts timo-pi5@192.168.0.22:~/ DartVision_cv/
```

Auf der Erkennungseinheit:

```
chmod -R u+w ~/ DartVision_cv
find ~/ DartVision_cv -name __pycache__ -type d -exec rm -rf {} + 2>/dev/null
systemctl --user restart dartvision
```

Die zweite Zeile räumt mitgereiste Zwischenergebnisse weg, die zu einer anderen Python-Fassung gehören. Nur bei Codeänderungen nötig, nicht bei reinen Änderungen an der Konfiguration. Der Ordner `scripts` gehört dazu — die Auswerteskripte liegen dort.

Anzeigeeinheit:

```
python -m pytest -q
scp -r assets communication gui main.py requirements.txt \
    timo-pi3@192.168.0.25:~/ DartVision_display/
```

Auf der Anzeigeeinheit:

```
chmod -R u+w ~/ DartVision_display
systemctl --user restart dartvision-display
ls ~/ DartVision_display
```

Die Dateien müssen direkt dort liegen, kein verschachtelter Ordner darin. Die abschliessende Auflistung dient dieser Kontrolle.
Zurück auf einen Stand, ohne die Historie anzufassen:

```
git checkout vX.Y-beschreibung -- .
```

14.7.15 Datensicherung

Das Abbild der Speicherkarte ist die einzige Sicherung der Dienstdateien, der Netzkonfiguration und der Zuordnungsregeln der Kameras — alles Dinge, die in keinem Quelltextarchiv liegen.

Schritt	Vorgehen
1	Karte einstecken. Die Meldung, der Datenträger müsse formatiert werden, abbrechen — nicht formatieren
2	Zielordner auf einem äusseren Datenträger anlegen, nicht in einem Cloud-Ordner
3	Abbildwerkzeug mit erhöhten Rechten starten
4	Zielpfad und Dateiname mit der Endung `.img` wählen
5	Laufwerksbuchstaben der Karte doppelt prüfen
6	Lesen auslösen, nicht Schreiben. Dauer fünfzehn bis dreissig Minuten
7	Abbild anschliessend komprimieren; der leere Teil packt sich stark

Das Abbild wird so gross wie die gesamte Karte. Zum Zurückspielen muss die Zielkarte gleich gross oder grösser sein — Karten mit gleichem Aufdruck können unterschiedlich viele Sektoren tragen.

14.8 Beispiele der Aufträge an Claude Code

Die Programmteile des Hauptrechners sind einzeln an ein KI-gestütztes Werkzeug übergeben worden, Block für Block. Jeder Auftrag wurde vom Verfasser geschrieben, das Ergebnis von ihm geprüft und eingebaut. Mehrere davon gehören zum selben Funktionsblock, weil ein Block oft einen Nachtrag oder eine Berichtigung brauchte. Der Auftrag wurde vor der Übergabe von der KI aufbereitet. Wiederholende Textstellen wie, «was nicht geändert werden» darf oder automatische Tests sind für jeden Block enthalten. Diese wurden vorgängig bestimmt und jeweils auf neuen Auftrag angepasst.
Abgedruckt sind zwei davon, jeder im vollen Wortlaut und jeder der erste Auftrag seines Funktionsblocks. Sie stammen aus zwei verschiedenen Phasen und zeigen zwei verschiedene Anlässe: die Reaktion auf einen Messbefund und die Abstimmung zweier Teilsysteme aufeinander.
Beide folgen derselben Form. Sie nennen das Ziel, grenzen ab, was unverändert bleiben muss, geben die Umsetzung vor, verlangen Tests, nennen die Abnahmebedingungen und sagen ausdrücklich, was nicht Teil des Auftrags ist. Der Satz «Bei jedem Widerspruch melden statt selbst entscheiden» steht in zwei der drei Aufträge im Kopf und ist die tragende Regel der Zusammenarbeit.

14.8.1 Auftrag K1 — Konsensprüfung im Achsenschnitt

Einordnung. Phase 4, Erkennung und Wertung, Funktionsblock 7 «Wann eine Wertung gilt». Der Auftrag beginnt nicht mit einer Anweisung, sondern mit dem Messbefund aus zwei unabhängigen Reihen: mit zwei Kameras 22 von 22 richtig, mit drei Kameras 1 von 7. Vier Erklärungen sind darin ausdrücklich als widerlegt bezeichnet, damit sie nicht erneut untersucht werden. Entstanden ist daraus die Konsensprüfung in `consensus.py`.

Projekt: DartVision **Bearbeiter:** Claude Code **Vorgehen:** Bei jedem Widerspruch zwischen diesem Auftrag und dem bestehenden Code **melden statt selbst entscheiden.**

1 Messbefund (zwei unabhängige Reihen, 29 Wertungen)

Derselbe Dart wiederholt im **selben Loch**, drei Felder (D3, D14, D5), fünf Durchgänge je Reihe.

beteiligte Kameras	korrekt gewertet
zwei	**22 / 22**
drei	**1 / 7**

Der eine korrekte Dreikamerafall (Reihe 2, throw 116) lag mit r = 0,9670 deutlich neben dem Cluster der übrigen D5-Messungen (0,929–0,939) und traf das Polygon nur knapp. Faktisch sind alle sieben Dreikameramessungen verfälscht.
Fehlerbild: Bei drei Kameras liefert eine der drei eine entartete Schätzung. Beispiel Reihe 1, throw 38 (Dart im Doppelring):

```
cam2  r=0,9398  w=173,1   plausibel
cam3  r=0,9503  w=184,5   plausibel
cam1  r=0,0134  w= 99,7   Boardmitte  ← Ausreisser, conf=0,821 (höchste der drei!)
```

Ergebnis: D19 statt D3 — 18° Winkelfehler, ein Nachbarsegment daneben.
Ursache: Eine einzelne Kamera bestimmt keinen Punkt, sondern eine Gerade. Zeigt ein Dart annähernd auf eine Kamera zu, erscheint er dort verkürzt. Achsenrichtung und Position der Spitze sind auf ihr nicht mehr sicher bestimmbar und die Schätzung rutscht entlang der Geraden — bis in die Boardmitte. Beim

flachen Blickwinkel des Aufbaus wird 1 cm Versatz entlang des Darts zu mehreren Zentimetern auf dem Board.
Verfügbares Erkennungsmerkmal: `fit_residual_rms_norm` ist bei zwei Kameras mathematisch zwingend 0,0 (zwei Geraden schneiden sich exakt) und schlug bei **allen** Dreikamerafällen aus: 0,0060 · 0,0136 · 0,0167 · 0,0296. Zusätzlich `axis_pair_angle_min_deg` — bei throw 107 nur 0,63°, also nahezu parallele Sichtlinien.
Ausdrücklich widerlegt (nicht erneut untersuchen):

- Kalibrierung, Skala, Polygone — D14 mit 1,3 mm Spanne über fünf Messungen
- eine einzelne schlechte Kamera — jede Kamera ist mal Ausreisser, abhängig von der Wurfrichtung
- Konfidenz als Kriterium — der Ausreisser in throw 38 hatte die **höchste** Konfidenz
- Gewichtung — Gleichgewichtung würde den Ausreisser stärker gewichten

2 Ziel

Bei drei verfügbaren Kameraschätzungen wird die abweichende erkannt und verworfen, bevor der Schnittpunkt berechnet wird.
Oberste Regel: Das Verhalten bei zwei Kameras bleibt unverändert. 22/22 korrekt — dieser Pfad wird nicht angefasst.

3 MUSS UNVERÄNDERT BLEIBEN

- `src/dart_detection.py` — Schwellwerte, Konturlogik, Duplikatschutz
- `src/board_model.py`, `config/calibration.yaml`, `config/cameras.yaml`
- `src/camera_diagnostics.py` — Spalten dürfen **ergänzt**, nicht umbenannt werden
- Der Zweikamerapfad in `fuse_axis_estimates` — bitidentisch
- `camera_weights` (0.6 / 1.0 / 0.6) und die Berechnung `max(confidence × camera_weight, 0.01)`

Änderungen an `scoring.py` sind zulässig, aber **nur** im Dreikamerapfad der Fusion.

4 Umsetzung

Bei genau drei gültigen Kameraschätzungen:

0. Eingangsprüfung je Kamera. Eine Kameraschätzung wird gar nicht erst zugelassen, wenn contour_len_px fehlt oder unter min_contour_len_px liegt (Vorgabe 50). Begründung: Aus einer im Bild stark verkürzten Kontur ist die Achsenrichtung nicht bestimmbar; gemessene Werte der Ausreisser 14–37 px gegenüber 84–176 px bei brauchbaren Schätzungen. Fallen dadurch alle bis auf eine Kamera weg, wird der Wurf nach bisheriger Logik behandelt (kein Verlust). Neue Protokollspalte rejected_short_contour.
1. **Drei Paarlösungen berechnen** — (1,2), (1,3), (2,3). Jede ist ein exakter Schnittpunkt zweier Geraden.
2. **Paare mit entarteter Geometrie ausschliessen:** Schnittwinkel unter `min_pair_angle_deg` (Vorgabe **3.0**). Bei throw 107 lag er bei 0,63°.
3. **Konsens bilden:** Liegen zwei der drei Paarlösungen näher beieinander als `consensus_tolerance_norm` (Vorgabe **0,03** ≈ 5 mm) und die dritte weiter entfernt, wird die Kamera verworfen, die

nur in den abweichenden Paaren vorkommt. Ergebnis ist dann die Zweikameralösung der übrigen beiden — also exakt der Pfad, der 22/22 erreicht hat.

4. **Kein klarer Konsens** (alle drei weit auseinander oder alle nah beieinander): Verhalten wie bisher, keine Verwerfung.
5. **Fallback:** Führt die Verwerfung auf weniger als `min_valid_cameras` (2), bleibt es beim bisherigen Verhalten. Ein Wurf darf durch diese Prüfung **nie** verloren gehen.

Alle Schwellwerte konfigurierbar unter `dart_detection.consensus:` in `board.yaml`, mit Schalter `enabled` (Vorgabe `true`) und `min_pair_angle_deg`, `consensus_tolerance_norm`.
Nicht über einen `rms`-Schwellwert lösen: throw 116 (korrekt) hatte mit 0,0167 einen höheren Wert als throw 64 (falsch) mit 0,0136. `rms` zeigt zuverlässig *dass* ein Widerspruch besteht, aber nicht, welche Kamera schuld ist. Die Paarlösung tut beides.

5 Protokollierung

In `debug_cameras.csv` ergänzen:

Spalte	Inhalt
`consensus_applied`	true/false — wurde eine Kamera verworfen
`consensus_dropped_cam`	verworfene Kamera-ID, sonst leer
`pair_solutions`	die drei Paarlösungen, z. B. `"12:0.950/182.2;13:0.121/99.1;23:0.948/184.4"`
`pair_spread_norm`	grösster Abstand zwischen zwei Paarlösungen

`used_in_fit` muss die Verwerfung korrekt abbilden.
Zusätzlich all_pairs_disagree (true/false) — wenn alle drei Paarlösungen weiter als consensus_tolerance_norm auseinanderliegen. Dieser Fall (throw 116) ist ein Wurf ohne verwertbaren Konsens; er soll protokolliert werden, damit sich später entscheiden lässt, ob solche Würfe zu verwerfen sind.

6 Tests

- Kunstfall mit drei Geraden, zwei übereinstimmend, eine entartet → die dritte wird verworfen, Ergebnis entspricht der Zweikameralösung
- Drei übereinstimmende Geraden → keine Verwerfung
- Zwei Kameras → Pfad bitidentisch, `consensus_applied=false`
- Schnittwinkel unter Schwelle → Paar ausgeschlossen, kein Absturz
- `enabled: false` → Verhalten exakt wie vor diesem Auftrag
- **Die bestehenden 170 Tests müssen grün bleiben** (`python -m pytest -q`)

7 Abnahme

- [ ] 170 bestehende Tests grün, neue Tests grün
- [ ] `consensus.enabled: false` → Verhalten identisch zu vorher
- [ ] Messreihe am Aufbau: 5 Durchgänge D3 · D14 · D5, gleiche Löcher → **Ziel: 15/15 korrekt**, insbesondere alle Dreikamerafälle
- [ ] `analyze_camera_agreement.py` läuft weiterhin durch

- [ ] Kein Wurf geht durch die Prüfung verloren

8 Nicht Teil dieses Auftrags

Duplikatschutz · Konfidenzsperren · Polygontoleranz · Boardrand-Fehlwürfe (§5.2) · Änderung der Kameragewichte · LED · Anzeige · Selbststart · Hotspot.

14.8.2 Auftrag 3c — LED-Ereignisse über WLED

Einordnung. Phase 6, Ereignisfarben und Betriebsführung, Funktionsblöcke 5 und 6. Der Auftrag betrifft zwei Teilsysteme zugleich: Der LED-Ring meldet Spielereignisse zurück und ist gleichzeitig die Beleuchtung der Kameras. Abschnitt 5 «Wichtigster Punkt» verlangt deshalb die Wertungssperre über die gesamte Effektdauer. Entstanden ist daraus das Modul `led_control.py` samt der Sperre, die in Phase 6 beschrieben ist.

Projekt: DartVision **Bearbeiter:** Claude Code **Vorgehen:** Bei jedem Widerspruch zwischen diesem Auftrag und dem bestehenden Code **melden statt selbst entscheiden.**

1 Ziel

Der LED-Ring meldet Spielereignisse zurück. Er ist gleichzeitig die Kamerabeleuchtung — jeder Lichtwechsel macht das Hintergrundbild der Erkennung ungültig. Deshalb gilt als oberste Regel:

> **Effekte ausschliesslich an Aufnahmegrenzen. Kein Effekt bei Einzeltreffern.**

Während und unmittelbar nach jedem Effekt darf die Erkennung nicht werten.
Ausgangslage: Die Erkennung erreicht aktuell **24/25 = 96 %** über geworfene Darts (23 von 25 Würfen über drei Kameras, alle korrekt). Dieser Wert darf durch den LED-Einbau nicht sinken.

2 MUSS UNVERÄNDERT BLEIBEN

Diese Dateien sind eingefroren. Werden Änderungen daran nötig, **abbrechen und melden**:

- `src/dart_detection.py` — verifizierte Erkennung, Schwellwerte, Konturlogik, Duplikatschutz
- `src/consensus.py` — Konsensprüfung und Konturgate (Auftrag K1)
- `src/camera_diagnostics.py` — Spalten dürfen ergänzt, nicht umbenannt werden
- `src/board_model.py` — Ringradien, Scoring-Geometrie
- `src/calibration.py`, `config/calibration.yaml` — korrigierte Sollwerte (Auftrag K2)
- `config/board.yaml` — Ausnahme: neue Schlüssel unter `led:` dürfen ergänzt werden. Unverändert bleiben insbesondere `roi_radius_norm: 1.20`, `max_area: 4000`, `min_area: 40`, der Block `dart_detection.consensus` und `debug.per_camera_log`.

Einzige zulässige Ausnahme: Wenn die Erkennung während eines Effekts angehalten werden muss (siehe §5), darf dafür eine Schnittstelle in `dart_detection.py` ergänzt werden — aber **nur** als neue, von aussen gesetzte Sperre. Keine Änderung an Schwellwerten, Konturlogik, Konsensprüfung oder Duplikatsschutz. Vorher melden.

3 Ereignisse (verbindlich)

Ereignis	Verhalten
Systemstart	Rot, sobald die Anwendung startet — **bis Betriebsbereitschaft** (Kameras offen, Kalibrierung geladen, Netzwerkbrücke bereit). Dann Grün 2500 ms, dann Vollweiss.
Überwurf (Bust)	Rot 2500 ms, dann Vollweiss
Sieg	Grün 5000 ms, dann Vollweiss
Spielerwechsel	**kein Effekt**
Einzeltreffer	**kein Effekt**
Grundzustand	Vollweiss (Kamerabeleuchtung)

Beruhigungszeit: Nach jeder Rückkehr auf Vollweiss 1500 ms, in denen die Erkennung nicht wertet. Wert konfigurierbar.
Falls die Betriebsbereitschaft nicht sauber feststellbar ist, melden — dann wird auf Rot 2500 ms als feste Dauer zurückgefallen. Nicht selbst entscheiden.

4 Technische Vorgaben

Ort: Neues Modul `src/led_control.py` im CV-Repo (läuft auf dem Raspberry Pi 5). Begründung: Die Ereignisse entstehen in der Spiellogik auf dem Pi 5, die Strecke Pi 5 → WLED ist verifiziert und die Beruhigungszeit koppelt direkt an die Erkennung, die ebenfalls dort läuft. Der Anzeige-Client (Pi 3) bleibt reiner Empfänger.
Schnittstelle: Die Spiellogik ruft nur benannte Ereignisse auf (z. B. `on_ready()`, `on_bust()`, `on_win()`). Farben, Zeiten und HTTP-Details bleiben im Modul gekapselt.
Ansteuerung über die WLED-HTTP-API:

```
Vollweiss:  http://<host>/win&A=255&R=255&G=255&B=255
Rot:        http://<host>/win&A=255&R=255&G=0&B=0
Grün:       http://<host>/win&A=255&R=0&G=255&B=0
```

`led.host` ist Vorgabe `192.168.0.21`. Der Wert muss zur Laufzeit aus der Konfiguration kommen und **darf nicht fest im Code stehen** — im späteren Hotspot-Betrieb kann sich die Adresse ändern.
Nicht blockierend: Effekte laufen in einem Hintergrund-Thread. Die Spiellogik und die Bildverarbeitung dürfen zu keinem Zeitpunkt auf eine LED-Antwort warten.
Fehlertolerant: Zeitlimit 1 s je Anfrage, bei Fehlschlag zwei Wiederholungen. Ein nicht erreichbarer LED-Controller wird **geloggt, hält das Spiel aber nie an.** Beim Systemstart ist ein Fehlschlag zu erwarten, weil der ESP32 länger braucht als der Pi — hier bis zu 30 s in 2-s-Schritten wiederholen.
Abschaltbar: Schalter `led.enabled` in `config/board.yaml`. Auf `false` verhält sich das System exakt wie bisher — notwendig für Regressionsmessungen ohne LED-Einfluss.
Konfigurierbar unter `led:` in `board.yaml`: `enabled`, `host`, `bust_duration_ms` (2500), `win_duration_ms` (5000), `ready_duration_ms` (2500), `settle_ms` (1500), `request_timeout_s` (1.0).

5 Wichtigster Punkt: Kopplung an die Erkennung

Ein Lichtwechsel macht das Hintergrundbild der Erkennung ungültig. Beim Überwurf kommt erschwerend dazu, dass der Spieler genau in diesem Moment die Darts zieht — das trifft die Duplikat- und Entfernungserkennung.
Verlangt wird:

1. **Sperre über die gesamte Effektdauer plus Beruhigungszeit.** Beim Überwurf also 2500 + 1500 = 4000 ms, in denen keine Wertung erfolgt.
2. **Hintergrundbild nach Rückkehr auf Vollweiss neu aufnehmen**, bevor die Sperre aufgehoben wird. Ist dafür ein Eingriff in eingefrorene Dateien nötig: **melden.**
3. Die Sperre wird von aussen gesetzt und wieder gelöst. Sie darf bei einem Fehler nicht dauerhaft stehen bleiben — Sperre immer über `try/finally` lösen.

Falls sich im bestehenden Code kein sauberer Punkt für diese Sperre findet: **melden, nicht improvisieren.**

6 Tests

- Modultests für `led_control.py` mit einem Attrappen-HTTP-Client: richtige Farbe, richtige Dauer, Rückkehr auf Vollweiss, Verhalten bei Zeitüberschreitung, Verhalten bei `enabled: false`
- Test, dass die Erkennungssperre gesetzt **und wieder gelöst** wird — auch wenn im Effekt eine Ausnahme auftritt
- Test, dass kein Aufruf die aufrufende Stelle länger als 50 ms blockiert
- Test, dass `led.host` aus der Konfiguration gelesen wird
- **Die bestehenden 186 Tests müssen unverändert grün bleiben** (`python -m pytest -q`)

7 Abnahme

- [ ] 186 bestehende Tests grün, neue Tests grün
- [ ] `led.enabled: false` → Verhalten identisch zu vorher
- [ ] Kein Effekt bei Einzeltreffern und bei Spielerwechsel
- [ ] Am Aufbau: Überwurf → Rot 2,5 s → Vollweiss; Sieg → Grün 5 s → Vollweiss; Start → Rot bis bereit → Grün 2,5 s → Vollweiss
- [ ] LED-Controller vom Netz getrennt → Spiel läuft weiter, Fehler nur im Log
- [ ] **Regressionsmessung 25 geworfene Würfe mit aktivem LED-Modul: Trefferquote ≥ 90 %** (Referenz ohne LED: 24/25 = 96 %)

Die Regressionsmessung ist Pflicht: Das LED-Modul verändert die Beleuchtungsbedingungen der verifizierten Erkennung.

8 Nicht Teil dieses Auftrags

Selbststart/systemd · Hotspot · Layout und Spielende-Dialog · Segment-5-Streuung · Effekte bei Einzeltreffern · Änderung der Erkennungsparameter.