

SLOTCAR STARTAMPEL

„Bären(n)keller“



▶ **Hardware-Dokumentation**



andreas wahl

Informationstechnik – Kommunikationstechnik – Elektronik
innovativ + kompetent + effizient

SLOT CAR STARTAMPEL

„Bären(n)keller“

Hardware-Dokumentation

Version 1.0 - 31.01.2024

Software-Version: 1.0

<https://github.com/Andreas-Wahl/STARTAMPEL-SW>

Hardware-Version: 1.3

<https://github.com/Andreas-Wahl/STARTAMPEL-HW>

Gehäuse-Version 1.0

<https://github.com/Andreas-Wahl/STARTAMPEL-3D>



andreas wahl

Informationstechnik – Kommunikationstechnik – Elektronik
innovativ + kompetent + effizient

<https://www.andreas-wahl.de/>

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Einführung und Ziele.....	4
Randbedingungen.....	7
Kontextabgrenzung.....	8
Lösungsstrategie.....	11
Bausteinsicht	12
Schaltungsentwicklung	13
Platinen-Layout.....	25
Qualitätsanforderungen.....	27
Technische Daten	30
Glossar	31
Ergänzende Informationen.....	32
Entwickler und Herausgeber	33

Einführung und Ziele

Idee und Namensgebung

In einer bereits über zwei Generationen bestehenden privaten Kellerbar, die ursprünglich den Namen „Bärenkeller“ erhalten hat, wurde eine CARRERA® digital 132 Rennbahn aufgebaut und die ersten Rennen ausgetragen.

Schnell fand dies bei Freunden und Bekannten großen Anklang. So wurde die Rennbahn sukzessive weiter ausgebaut und über mögliche Erweiterungen diskutiert.

So entstand auch die Idee einer eigenen Startampel, da die originale Startampel CARRERA® Startlight (30354) nicht über drei Fahrspuren (zwei Fahrspuren + Boxengasse) überbrücken kann. Weiter sollte die eigene Startampel nicht nur die Start-Sequenz über rote Anzeigen darstellen können, sondern auch den freigegebenen Rennbetrieb mit grünen LEDs, den Safety-Car-/Pace-Car-Betrieb und einen Frühstart anzeigen.

Kurzerhand wurde die Idee aufgegriffen, das Datensignal mit Oszilloskop und Datenlogger analysiert und die Entwicklung von Hardware, Software und Gehäuse-Design angestoßen.

In Bezug auf den „Bärenkeller“, welcher durch die Erweiterung der CARRERA® digital 132 Rennbahn zum „Bärenkeller“ umbenannt wurde, erhielt auch die selbst entwickelte Startampel den Namen „STARTAMPEL „Bären(n)keller““.

Die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ fand so großen Anklang, dass sich der Entwickler entschlossen hat, eine kleine Menge als „Prototypen“ zu produzieren und die Entwicklung für nicht kommerzielle Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Die Elektronik und das Gehäusedesign sind unter der Creative Commons Version 4.0 Lizenz „Namensnennung, nicht kommerziell, Weitergabe unter gleichen Bedingungen (CC BY-NC-SA 4.0)“ und die Software unter der „GNU Affero General Public License, Version 3.0“ veröffentlicht.

Über diese Dokumentation

Nachfolgend wird die für die „STARTAMPEL „Bären(n)keller“ entwickelte Elektronik betrachtet und beschrieben.

Das Projekt „STARTAMPEL „Bären(n)keller“ soll insbesondere dazu anregen, sich spielerisch mit der Elektronik und der Programmierung von Mikrocontrollern, insbesondere in Assembler, auseinanderzusetzen.

Diese Dokumentation soll als Hilfestellung dienen und weitere Anreize und Ideen für interessanten Projekten bei Spiel und Spaß bieten.

Entsprechend der Software-Dokumentation wurde auch die Hardware-Dokumentation weitgehend an den Aufbau und die Struktur der arc42¹-Software-Architekturdokumentation angelehnt. Dadurch erhalten sowohl die Software- als auch die Hardware-Dokumentation einen vergleichbaren Aufbau und eine durchgängige Struktur, was die Lesbarkeit und das Verständnis erleichtern sollen.

¹ arc42: <https://arc42.org/>

Aufgabenstellung

Für die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ wurden nachfolgend aufgeführte und beschriebene Funktionen festgelegt.

ID	Anforderung	Erklärung
M-1	THT-Aufbau	Damit die Elektronik auch von Anfängern leicht nachgebaut und gewartet werden kann, ist diese in Durchsteckmontage (THT, through-hole technology) aufzubauen.
M-2	AVR-Mikrocontroller	Für die Steuerung ist der AVR® Mikrocontroller Attiny2313 zu verwenden.
M-3	4x5 5 mm-LED Anzeige	Für die Anzeige der Startampel sind 5 mm LEDs zu verwenden, welche in 4 Reihen und 5 Spalten wie folgt aufzubauen sind: 2 Reihen in 5 Spalten rot, 1 Reihe grün, 1 Reihe gelb.
M-4	Unterbringung im Startampelgehäuse	Die komplette Elektronik muss im Gehäuse der Startampel untergebracht werden können.
M-5	Stromversorgung und Daten über den Fahrleiter	Die Stromversorgung der Elektronik muss über den Fahrleiter der CARRERA® digital Rennbahn erfolgen. Über diesen ist auch das Datensignal zu gewinnen.
M-6	Schutz vor Anschlussfehler	Die Elektronik muss vor fehlerhaftem Anschluss der Anschlussleitungen geschützt werden.
M-7	Schutz vor Überspannung	Die Elektronik muss vor Überspannungen, welche auf dem Fahrleiter auftreten könnten, geschützt werden.
M-8	Zugängliche ISP-Schnittstelle	Für die Software-Entwicklung und spätere Aktualisierungen muss die ISP-Schnittstelle des Mikrocontrollers über Pfostenverbinder zugänglich sein.
M-9	Einfacher Nachbau	Die Schaltung soll auch für Einsteiger verständlich und leicht nachzubauen sein. Auch bei der Bauteilauswahl soll daher auf gut verfügbare Bauteile und Werte Rücksicht genommen werden.

Qualitätsziele

Folgende wesentliche Qualitätsanforderungen wurden für die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ bestimmt:

ID	Anforderung	Erklärung
Q-1	Korrektheit	Die jeweils signalisierten Zustände müssen korrekt sein.
Q-2	Zuverlässigkeit	Die Zustände müssen zuverlässig signalisiert werden.
Q-3	Leistungsfähigkeit	Schnelle Auswertung und kurze Reaktionszeit.
Q-4	Darstellung	Gute und eindeutige Darstellung der einzelnen Zustände.

Stakeholder

Folgende Personen und Gruppen haben Interesse am Aufbau, an der Funktion und Qualität der Elektronik (Hardware) der STARTAMPEL „Bären(n)keller“:

Rolle	Ziel	Erwartungshaltung
Rennleitung	Zuverlässiger Betrieb.	Möchte eine zuverlässige und störungsfreie Funktion.
Fahrer	Schnelle, zuverlässige und fehlerfreie Signalisierung.	Möchte die Zustände des Rennbetriebes schnell, korrekt und zuverlässig erkennen können.
Zuschauer	Gute Visualisierung des Rennbetriebes.	Möchte die Zustände des Rennbetriebes gut und ohne Verwechslungsgefahr erkennen können.

Folgende Personen und Gruppen haben Interesse am Schaltplan und einer Beschreibung der Hardware für die STARTAMPEL „Bären(n)keller“:

Rolle	Ziel	Erwartungshaltung
Entwickler	Effizientes Umsetzen der definierten Anforderung in der Hardware.	Gute und detaillierte Beschreibung der zu erwartenden Funktionen und Qualitätsziele sowie umfangreiche Dokumentation der angebundenen Systeme.
Tester	Prüfen der Anwendung auf mögliche Fehler.	Ausfallsichere und langlebige Hardware, die robust gegenüber möglichen Störungen und Fehlbedienung ist
Nutzer	Möchte die Elektronik nachbauen und bei Bedarf reparieren.	Leichter Nachbau, klare, präzise und fehlerfreie Dokumentation.

Randbedingungen

Für die Entwicklung der Elektronik (Hardware) für die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ liegen folgende Randbedingungen vor.

ID	Anforderung
RB-1	Mikrocontroller: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Microchip AVR®-Mikrocontroller ATtiny2313² ▶ 8 MHz Taktfrequenz, interner Takt ▶ Interner SRAM ▶ Externen Interrupt ▶ 7 digitale Ausgänge ▶ In-System-Programmierung und debugWIRE
RB-2	Carrera® digital 124/132 Rennbahn ³ <ul style="list-style-type: none"> ▶ 14,8 V Fahrspannung bei 132 (18 V Fahrspannung bei 124) ▶ 10 kHz Manchester Code
RB-3	5mm-LEDs für die Anzeige <ul style="list-style-type: none"> ▶ 2 Reihen rot in 5 Spalten ▶ 1 Reihe grün ▶ 1 Reihe gelb
RB-4	Verfügbarer Platz im Gehäuse der STARTAMPEL „Bären(n)keller“: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Breite: 79 mm ▶ Höhe: 39 mm ▶ Tiefe: 41 mm +15 mm für LEDs
RB-5	Die Schaltung und das Platinen-Layout sind mit der Open-Source Schematic Capture & PCB Design Software KiCAD EDA ⁴ zu entwickeln.
RB-6	Für Schaltungssimulationen ist die von ANALOG DEVICES ⁵ kostenlos zur Verfügung gestellte Simulationssoftware LTspice ⁶ zu verwenden.

² Microchip ATtiny2313: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATtiny2313>

³ CARRERA® digital 132 Rennbahn: <https://carrera-toys.com/digital-132>

⁴ KiCad Open Source Electronics Design Automation Suite: <https://www.kicad.org/>

⁵ ANALOG DEVICES: <https://www.analog.com/en/index.html>

⁶ LTspice: <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

Kontextabgrenzung

Fachlicher Kontext

Spannungsversorgung

Die Fahrbahnen der CARRERA® digital 124/132 Rennbahnen⁷ werden mit folgende Versorgungsspannungen betrieben:

Variante/Maßstab	Nennspannung	Nennstrom	Nennleistung
digital 124	18 V	3 A	54 VA
digital 132	14,8 V	3,5 A	51 VA

Die hier beschriebene Hardware wurde für die CARRERA® digital 132 dimensioniert. Daher berücksichtigt diese Dokumentation maßgeblich die Nennspannung von 14,8 V.

Über die Fahrspannung wird das Datensignal in Anlehnung an den Manchester Code⁸ moduliert.

Im Abstand von 6,2 ms folgen Datenpakete mit einer Länge von acht bis zwölf Bits und einer Dauer von 0,8 bis 1,2 ms.

Während der Übertragung wird die Spannungsversorgung entsprechend dem Flankenwechsel des Datensignales unterbrochen. Die längste Low- (GND-) Phase liegt außerhalb einer Boxengasse entsprechend der Übertragungsfrequenz von 10 kHz bei 100 µs Periodendauer. Für den Datenempfang von Fahrzeugen und Zubehör erzeugt die CARRERA® digital Control-Unit ebenfalls Low- (GND-) Phasen mit einer Länge von 50 µs, auf die bei Bedarf mit einem Hochziehen des Signales auf High-Potential geantwortet wird.

Datensignal

Die Datenübertragung erfolgt im Manchester-Code mit einer Übertragungsfrequenz von 10 kHz, was einer Übertragungsrate von 10 Kbaud entspricht.

Werden aufeinanderfolgend gleiche Bits (bspw.: 00000000 oder 11111111) übertragen, findet ein Flankenwechsel alle 50 µs statt, was einer Frequenz von 20 kHz entspricht.

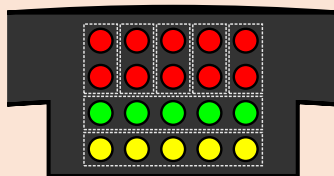
Bei jeweils aufeinanderfolgend unterschiedlichen Bits (bspw. 01010101), erfolgt der Flankenwechsel alle 100 µs, was einer Frequenz von 20 kHz, entspricht.

Der durchschnittliche Tastgrad (Duty-Cycle) des Manchester-Code-Datensignals beträgt 0,5 (50 %).

Anzeige-Einheit

Die Anzeigeeinheit der STARTAMPEL „Bären(n)keller“ soll aus jeweils 5 x 2 roten LEDs für die Anzeige der Startsequenz (Countdown), 5 grünen LEDs für die freigegebene Rennstrecke und 5 gelbe LEDs für die Pace-Car/Safety-Car-Phase bestehen.

LED-Anzeige/Display

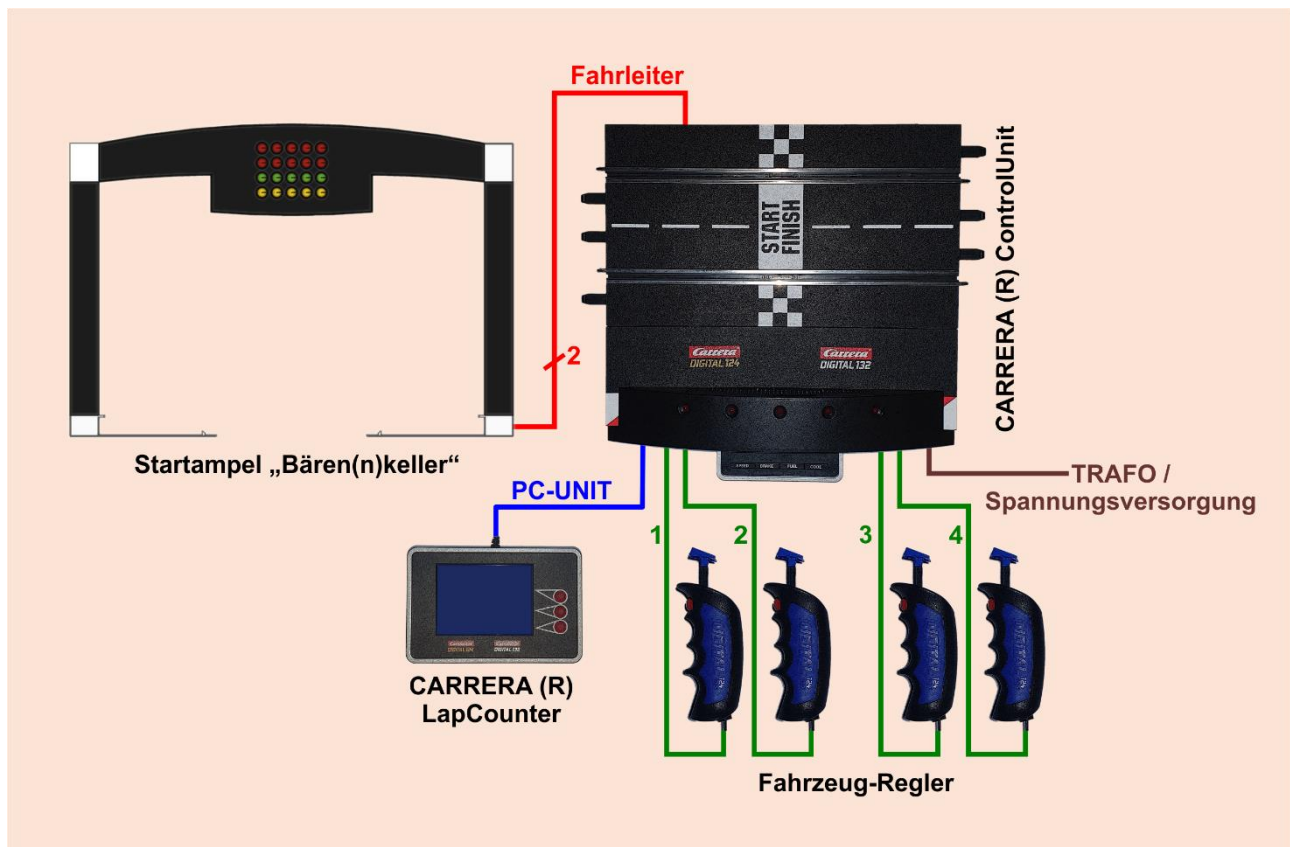


⁷ CARRERA® digital 132 Rennbahn: <https://carrera-toys.com/digital-132>

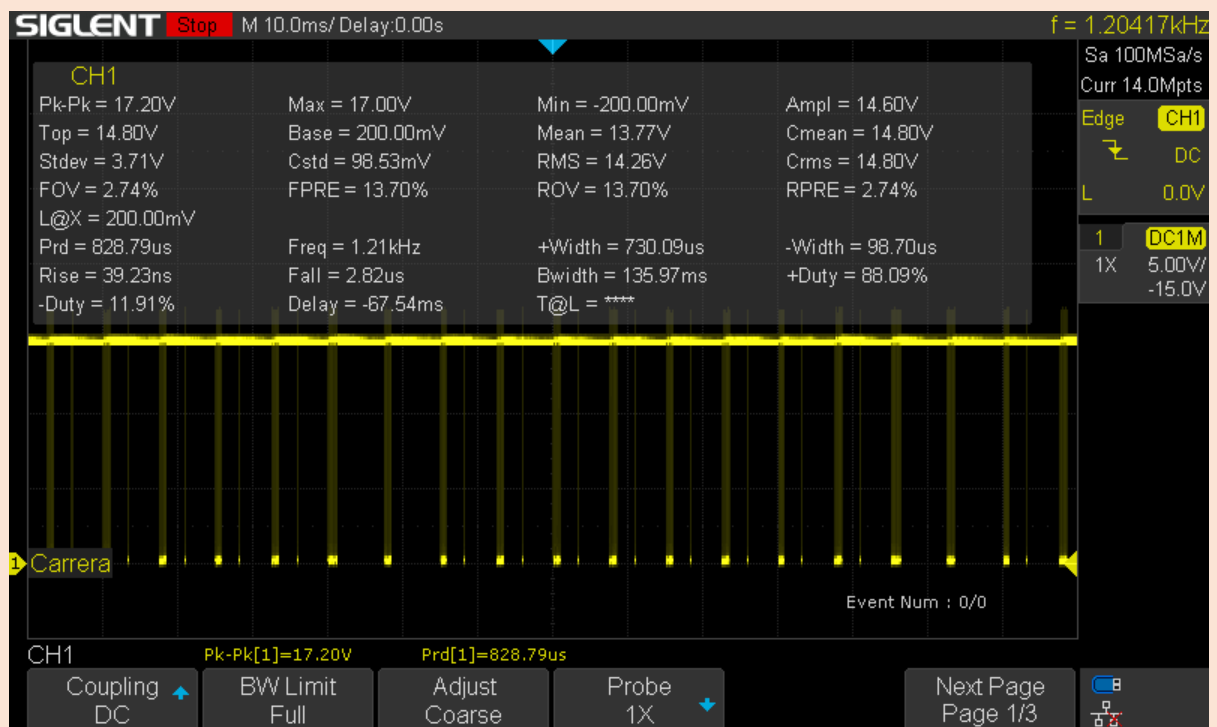
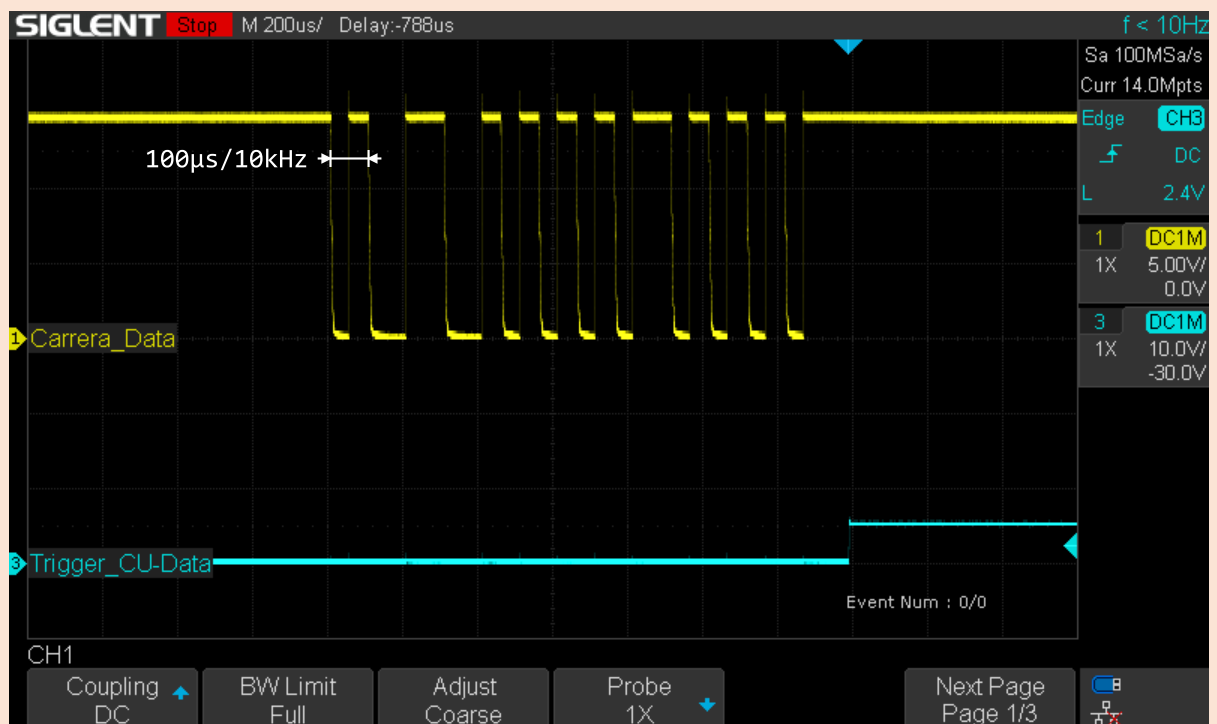
⁸ Manchester Code: <https://de.wikipedia.org/wiki/Manchester-Code>

Technischer Kontext

Übersicht der Komponenten



Bezeichnung	Beschreibung
Control-Unit	Zentraleinheit der CARRERA® digital 124/132 Rennbahn für die Bedienung und Steuerung des Rennbetriebs und Anschluss aller Komponenten.
Lap-Counter	Rundenzähler für die CARRERA® digital 124/132 Rennbahn. Über diesen werden Zeit- und Rundenrennen gestartet und das Rennen entsprechend beendet, wenn Zeit oder Anzahl der Runden erreicht wurden. Der Sieger, bzw. das Fahrzeug, welches das Rennen beendet, wird durch den Lap-Counter signalisiert. Alternativ können an der PC-Unit-Schnittstelle auch anderweitige Lösungen, wie bspw. PC-Software, angebunden werden.
Regler	Mit den Reglern (Controller / Drucker) werden die Fahrzeuge (fern-) gesteuert. Es können bis zu 6 Regler gleichzeitig angeschlossen werden.
Fahrzeug	Das Fahrzeug (Slotcar) im Maßstab 1:24 bzw. 1:32 fährt mittels Leitkiel in einem Schlitz seiner zugehörigen Fahrspur auf der Rennstrecke. Über Kontaktschleifer wird das Fahrzeug über die Fahrbahn mit Spannung versorgt. Bei der CARRERA® digital 124/132 Rennbahn erhält das Fahrzeug über den Fahrleiter auch die Steuerinformationen mittels Datenpaketen im Manchester Code. Es können bis zu 8 Fahrzeuge (6x Regler +1 Ghost Car +1 Pace Car) zeitgleich auf der Rennstrecke fahren.
Startampel	Die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ ergänzt die Rennstrecke um eine Visualisierung der Start-Sequenz, des Zustandes der Rennstrecke usw.
Datenpakete	Mittels Datenpaketen, welche im Manchester-Code über den Fahrleiter gesendet werden, kommuniziert die CARRERA® digital 124/132 Control-Unit mit Fahrzeugen und Zubehör (wie Weichen, Zeitmessungen, Boxengassen u. ä.). Auch die für die STARTAMPEL „Bären(n)keller“ erforderlichen Informationen werden auf diese Weise übertragen.

CARRERA® digital 124/132 Spannungsversorgung mit Datenpaketen**CARRERA® digital 124/132 Control-Unit-Datenpaket**

Zur Datenanalyse wurde jeweils das Oszilloskop SIGLENT SDS1204X-E verwendet. Mittels Bildbearbeitungsprogramm wurden den Oszilloskop-Auszüge weitere Informationen hinzugefügt.

Lösungsstrategie

Die Elektronik wird in zwei Platinen

- ▶ **Hauptplatine**
(Enthält alle Komponenten zur Auswertung des Datensignals.)
- ▶ **Displayplatine**
(Enthält alle Komponenten für die LED-Anzeige.)

aufgeteilt, welche über Stift- und Buchsenleisten jeweils rückseitig zusammengesteckt werden und damit eine Einheit bilden.

Auf den einzelnen Platinen wird die Elektronik in Funktionsblöcken aufgeteilt, die in der nachfolgenden Beschreibung näher betrachtet werden:

Hauptplatine:

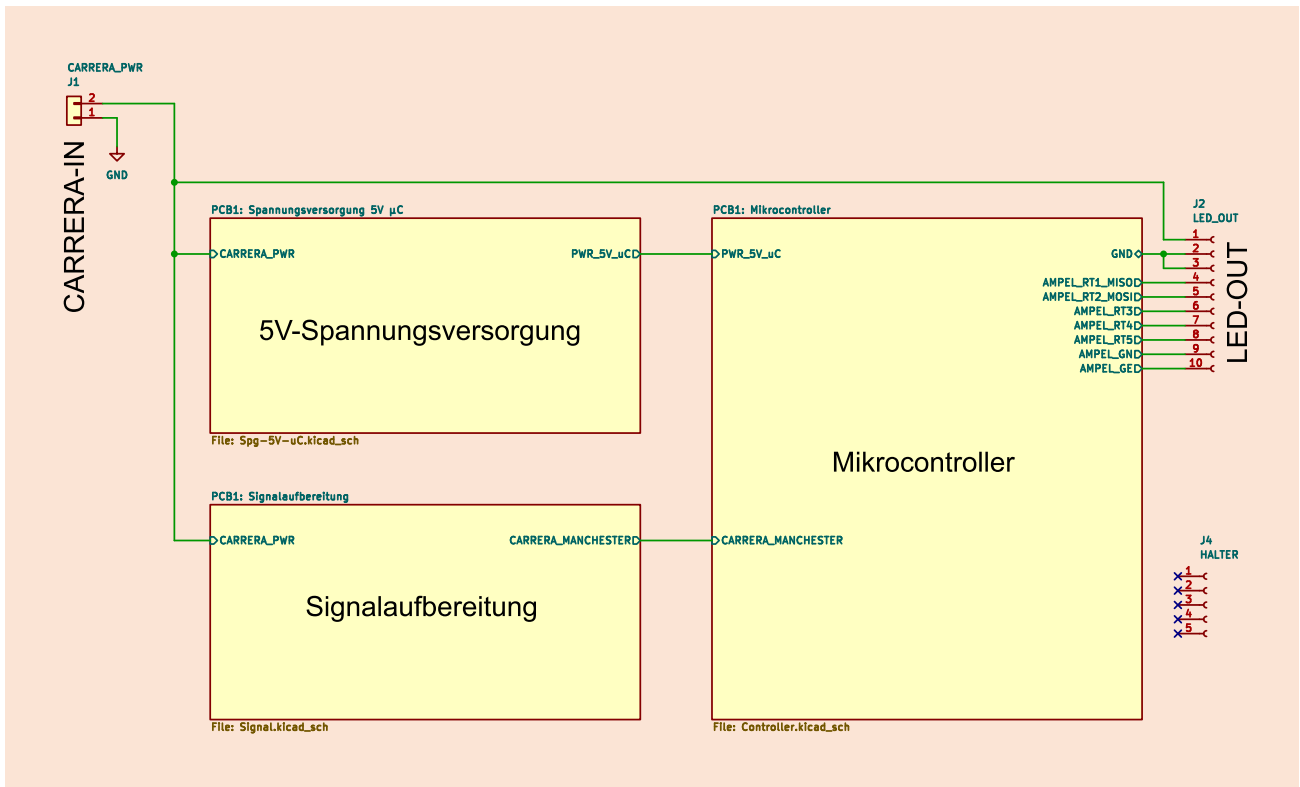
- ▶ **Spannungsversorgung Mikrocontroller**
(Stellt aus der Fahrspannung der CARRERA® digital Rennbahn eine stabile +5 V Spannungsversorgung für den Mikrocontroller bereit.)
- ▶ **Signalaufbereitung**
(Bereitet das auf der Fahrspannung der CARRERA® digital Rennbahn modulierte Datensignal für die Verarbeitung über einen Porteingang des Mikrocontrollers auf.)
- ▶ **Mikrocontroller**
(Enthält den Mikrocontroller und dessen zum Betrieb erforderliche Komponenten.)

Displayplatine:

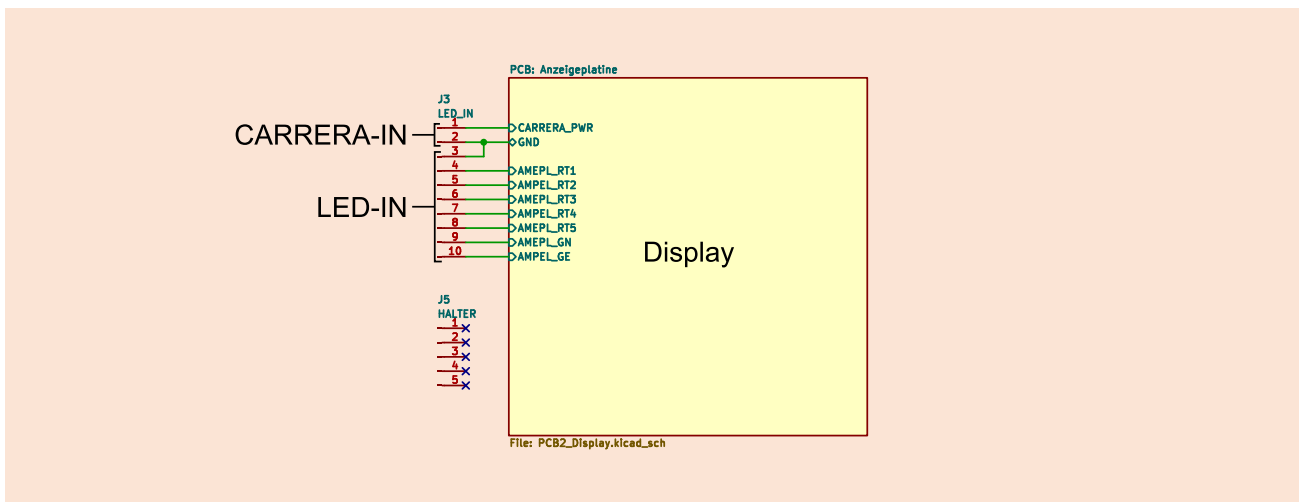
- ▶ **LED-Anzeige**
(Enthält die LEDs der Startampel, sowie die notwendigen Treiber.)

Bausteinsicht

Hauptplatine



Displayplatine (LED-Anzeige)



Schaltungsentwicklung

Stromversorgung (Hauptplatine)

Eckdaten

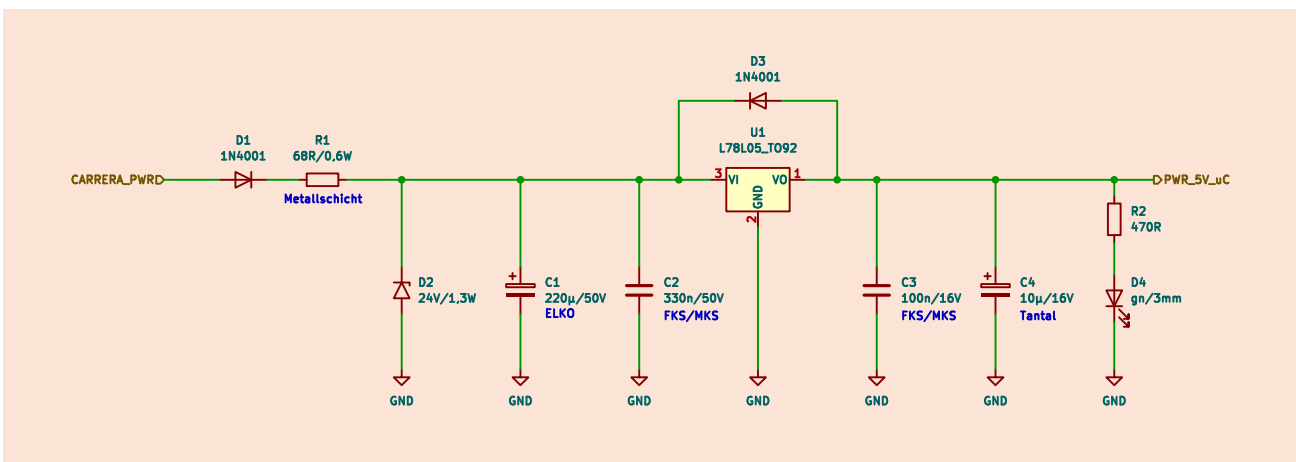
Auf der Hauptplatine benötigt der Microchip AVR®-Mikrocontroller ATtiny2313 und seine externe Beschaltung eine Spannungsversorgung von 5 V.

Zur Ermittlung des Strombedarfes werden folgende Komponenten berücksichtigt:

Nr.	Komponente	Strombedarf
1	Mikrocontroller Atmel 2313 mit internem Oszillator bei 8 MHz	7,5 mA
2	Spannungsregler	6 mA
3	Power-LED, 3 mm, grün	10 mA
4	Debug-LED, 3 mm, gelb	10 mA
5	Debug-LED, 3 mm, rot	10 mA
6	Ansteuerung Treiberbaustein ULN2003A (maximal 5 Treiber zeitgleich aktiv)	5x1,35 mA =6,75 mA
Maximaler Gesamtstrombedarf (I_{cc}):		50,3 mA

Schaltungsaufbau

Die dargestellte Schaltung zur 5 V-Spannungsversorgung des Mikrocontrollers mit einem linearen Festspannungsregler wird im Folgenden näher beschrieben.



Verpolungsschutz und Rückwirkungsfreiheit

Um die Schaltung vor fehlerhaftem Anschluss zu schützen, wird am Eingang eine 1N4001-Diode (D1) in Durchlassrichtung eingesetzt. Zudem verhindert die Diode am Eingang Rückwirkungen auf das durch die Control-Unit modulierte Datensignal der Fahrspannung, die durch die nachfolgenden Glättungs- und Siebkondensatoren verursacht werden könnten.

Vorwiderstand

Um die Verlustleistung am nachfolgenden Spannungsregler zu begrenzen, wird ein Vorwiderstand in Reihe geschaltet. Ziel ist es, die Verlustleistung zwischen Widerstand und Spannungsregler so zu verteilen, dass es bei keinem der beiden Bauteile in Extremfällen zu einer Überlastung kommen kann.

Damit dem Spannungsregler eine ausreichende Eingangsspannung zur Verfügung steht, ist die maximal am Vorwiderstand abfallende Spannung wie folgt zu berechnen:

$$U_{R1} = U_{RV} = U_{CC} - U_{D1} - U_{U1} - U_{U1_Ausgang}$$

Die im Datenblatt⁹ des Spannungsreglers 78L05 von ST angegebene Dropout-Spannung beträgt 1,7 V. Um die Störunterdrückung bei eingangsseitigen Spannungsschwankungen in den vom Hersteller angegebenen Grenzen zu halten, wurden 300 mV Regelreserve für die Betriebssicherheit berücksichtigt.

$$U_{U1} = U_{U1_DropOut} + U_{U1_Regelreserve} = 1,7 V + 0,3 V = 2 V$$

Damit ergibt sich für die am Vorwiderstand maximal abfallende Spannung:

$$U_{R1} = 14,8 V - 0,7 V - 2 V - 5 V = 7,1 V$$

Die von der Control-Unit übertragenen Daten sind periodisch und nicht sinusförmig (Rechteck). Das für die Spannungsversorgung bei der Manchester-Code-Übertragung ungünstigste Tastverhältnis liegt bei 0,5. Bei einem Tastverhältnis von 50 % und einem Gleichstrommittelwert von 50,3 mA muss somit in der ersten Halbwelle des Rechtecksignals der doppelte Strom zur Verfügung stehen, damit die Schaltung mit ausreichend Energie versorgt wird. (Siehe auch Pulsweitenmodulation¹⁰)

Somit ergibt sich für den Vorwiderstand:

$$R_1 = R_V = \frac{U_{R1}}{I_{CC}} \times d = \frac{U_{R1}}{I_{CC}} \times \frac{t_{ein}}{t} = \frac{7,1 V}{50,3 mA} \times \frac{50 \mu s}{100 \mu s} = 70,6 \Omega$$

Durch die Auswahl eines 68 Ω -Vorwiderstandes aus der E12-Reihe ist der ungünstigste Fall des Tastverhältnisses für eine sichere und zuverlässige Versorgung der Schaltung mit der erforderlichen Energie berücksichtigt.

Berechnung der Verlustleistung am Vorwiderstand R₁:

Für den nach der E12-Serie ausgewählten 68 Ω Widerstand ergibt sich folgende mittlere Verlustleistung:

$$P_{R1} = \frac{U_{R1}^2}{R_1} \times d = \frac{(7,1 V)^2}{68 \Omega} \times \frac{50 \mu s}{100 \mu s} = 370,7 mW$$

Damit ist ein üblicher Kohleschichtwiderstand mit 1/4 W maximaler Verlustleistung für den zuverlässigen Dauerbetrieb nicht ausreichend. Hier wird deshalb ein 0,6 W Metallschichtwiderstand eingesetzt.

Überspannungsschutz

Eine nachgeschaltete Zenerdiode in Sperrichtung gegen Ground schützt die Schaltung vor möglichen Spannungsspitzen der Eingangsspannung, die durch Induktivitäten der Fahrzeuge und Weichen auf der CARRERA® digital Rennbahn verursacht werden könnten.

⁹ 78L05 – Datenblatt von ST: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l78l.pdf>

¹⁰ Pulsweitenmodulation: <https://www.mikrocontroller.net/articles/Pulsweitenmodulation>

Glättungskondensator

Die mit 10 kHz Manchester-Code modulierte Fahrspannung muss für eine stabile 5 V-Spannungsversorgung zunächst „geglättet“ werden, um auch in den Low-Phasen der Eingangsspannung den nachfolgenden Spannungsregler mit der erforderlichen Eingangsspannung von mindestens ca. 7,1 V sicher zu versorgen.

Bei einer mit Manchester-Code modulierten Spannung handelt es sich um eine periodische, nicht sinusförmige Rechteckspannung. Übliche Berechnungen für sinusförmige periodische Signale sind hier daher nicht zutreffend.

Kapazität

Da das Rechtecksignal einem wechselnden Ein- und Ausschalten einer an den Kondensator angeschlossenen Spannungsquelle entspricht, wird zur Ermittlung der erforderlichen Kapazität der Lade- und Entladevorgang des Kondensators betrachtet. Während der High-Phase des Rechtecksignals wird der Kondensator aufgeladen, und während der Low-Phase wird er entladen.

Für die Ladung eines Kondensators gilt:

$$Q = I \times t \text{ und } Q = C \times U$$

Daraus ergibt sich:

$$I \times t = C \times U$$

Die erforderliche Kapazität des Glättungskondensators lässt sich damit für einen Laststrom von $I_{CC}=50,3 \text{ mA}$, einer maximalen Restwelligkeit von $\Delta U_{U1_Ripple_Eingang}=0,1 \text{ V}$ und einer High-Phase des 10 kHz-Rechtecksignals von $t=50 \text{ }\mu\text{s}$, wie folgt berechnen:

$$C_1 = \frac{I_{CC} \times \Delta t}{\Delta U_{U1_Ripple_Eingang}} = \frac{50,3 \text{ mA} \times 50 \text{ }\mu\text{s}}{0,1 \text{ V}} = 25,2 \text{ }\mu\text{F}$$

Equivalent Series Resistance (ESR)¹¹ und Lebensdauer

Für die Auswahl eines Kondensators ist es, insbesondere bei höherfrequenten Spannungen, entscheidend, wie schnell sich der Kondensator aufladen lässt und wie schnell er die Ladung wieder abgeben kann. Maßgeblich hierfür ist der Innenserienwiderstand des Kondensators, auch als ESR (Equivalent Series Resistance) bekannt. Je niedriger der ESR, desto schneller kann der Kondensator auf- und entladen werden. Ein niedrigerer ESR bedeutet auch eine niedrigere Restwelligkeit des geglätteten Signals und eine niedrigere Verlustleistung im Kondensator.

Grundsätzlich bietet ein Tantal-Kondensator aufgrund seines vergleichsweise niedrigen äquivalenten Serienwiderstands (ESR) im Verhältnis zu seinen Abmessungen zu Elektrolytkondensatoren einen Vorteil. Allerdings sind Tantal-Kondensatoren teurer und empfindlicher gegenüber Ripplestrom-Überlastungen und schnellen Schaltflanken. Daher wurde für den Eingang des Spannungsreglers entschieden, einen vergleichbaren Elektrolytkondensator auszuwählen.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass sich bei Elektrolytkondensatoren der Innenserienwiderstand ESR mit dem Alter infolge der Diffundierung ihres Elektrolytes erhöht. Dabei sinkt auch die Kapazität. Die Lebensdauer von handelsüblichen Elektrolytkondensatoren bei Ausschöpfung der Nenndaten beträgt je nach Qualität etwa 2.000 bis 5.000 Betriebsstunden bei voller Ausnutzung der Kapazität und Einhaltung des Umgebungstemperaturbereichs. Durch höheres Dimensionieren kann eine

¹¹ Ersatzserien-Widerstand / Equivalent Series Resistance (ESR):

https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolytkondensator#Scheinwiderstand_Z_und_Ersatzserienwiderstand_ESR

Verlängerung der Lebensdauer erreicht werden, da der Elektrolytkondensator nicht im Grenzbereich betrieben wird und genügend Reservekapazität besteht.

Bei der Auswahl des Elektrolytkondensators wurde, ausgehend von einem Tantal-Kondensator¹² mit 33 µF Kapazität, ein ESR von ca. 77 mΩ gemessen.

Da sich bei Elektrolytkondensatoren mit steigender Frequenz die effektiv wirkende Kapazität verringert, wurde ein Elektrolytkondensator mit ausreichender Restkapazität in angegebenem Frequenzbereich ausgewählt, um die Restwelligkeit in oben berechneten Grenzen zu halten. Ein Elektrolytkondensator mit einer Kapazität von 220 µF hatte einen vergleichbaren ESR von ca. 77 mΩ und wird in dieser Schaltung eingesetzt.

Spannungsregler

Der Einsatz eines 5 V-Festspannungsreglers¹³ 78L05¹⁴ (U1) bietet eine einfache Möglichkeit, eine stabile Versorgungsspannung von 5 V bereitzustellen. Unter Berücksichtigung des ermittelten Strombedarfs ist der lineare Festspannungsregler 78L05 im TO-92 Gehäuse ausreichend und kann einen Strom von bis zu 100 mA liefern. Die maximal zulässige Eingangsspannung des 78L05 beträgt 30 V und wird durch die geringeren Fahrspannungen der Carrera® digital Rennbahnen nicht erreicht.

Um die 5 V Ausgangsspannung zuverlässig bereitzustellen, benötigt der 78L05 bei einer Dropout-Spannung von 1,7 V am Eingang eine Eingangsspannung von mindestens 6,7 V. Wie oben bereits erwähnt, sind für die Regelreserve zusätzliche 0,3 V berücksichtigt.

Restwelligkeit (Ripple)

Der vorgeschaltete Glättungskondensator wurde für eine Restwelligkeit von maximal $\Delta U_{U1_Ripple_Eingang} = 0,1 \text{ V}$ dimensioniert, sodass die erforderliche Eingangsspannung bereits sehr stabil und zuverlässig zur Verfügung steht. Über die Supply Voltage Rejection (SVR) lässt sich die zu erwartende Restwelligkeit am Ausgang eines Spannungsreglers berechnen.

Der hier eingesetzte lineare Festspannungsregler 78L05 von ST hat gemäß Datenblatt im ungünstigsten Fall ein SVR von -40 dB.

Für die Amplitude (A) gilt:

$$A = 20 \times \log \left(\frac{U_{Ausgang}}{U_{Eingang}} \right)$$

Nach Umstellung auf U_a

$$U_a = U_e \times 10^{\left(\frac{A}{20}\right)}$$

lässt sich die zu erwartende Restwelligkeit wie folgt berechnen:

$$\Delta U_{U1_Ripple_Ausgang} = \Delta U_{U1_Ripple_Eingang} \times 10^{\left(\frac{SVR}{20}\right)} = 0,1 \text{ V} \times 10^{\left(\frac{-40}{20}\right)} = 1 \text{ mV}$$

Verlustleistung

Die am Spannungsregler abfallende Verlustleistung berechnet sich wie folgt:

$$P_{U1} = U_{U1} \times I_{CC} = 2 \text{ V} \times 50,3 \text{ mA} = 100,6 \text{ mW}$$

¹² Tantal-Kondensatoren: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tantal-Elektrolytkondensator>

¹³ Festspannungsregler: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsregler>

¹⁴ 78L05 – Datenblatt von ST: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l78l.pdf>

Daraus ergibt sich eine Wärmeentwicklung von

$$\Delta T = P_{U1} \times \theta_{JA} = 100,6 \text{ mW} \times 200 \text{ K/W} = \mathbf{20,12 \text{ K}}$$

Bei einer Umgebungstemperatur von 25°C steigt die Temperatur auf 45,12°C. Eine für den eingesetzten Festspannungsregler ohne Kühlung mögliche Temperatur.

Schwingneigung

Um ein Schwingen des Spannungsreglers zu verhindern, ist gemäß dem Datenblatt am Eingang ein Kondensator mit einer Kapazität von 330 nF (C2) und am Ausgang ein Kondensator mit einer Kapazität von 100 nF (C3) vorzusehen. Dies wurde hier entsprechend übernommen.

Schutzdiode

Eine Diode (D3) in Sperrrichtung vom Eingang zum Ausgang des Spannungsreglers schützt diesen davor, dass dessen Ausgangsspannung nicht spürbar (hier maximal 0,7 V) über der Eingangsspannung liegen kann. Würde die Ausgangsspannung deutlich über der Eingangsspannung liegen, könnte dies den im Spannungsregler eingebauten Längstransistor zerstören. Dieser Fall könnte beispielsweise durch einen Kurzschluss am Glättungskondensator (C1) eintreten.

Pufferkondensator

Um die 5 V-Ausgangsspannung weiter zu stabilisieren, insbesondere zur Pufferung der Stromspitzen des Mikrocontrollers sowie als Blockkondensator zur Filterung von hochfrequenten Störungen, wird am Ausgang der 5 V-Spannungsversorgung ein 10 µF Tantal-Kondensator (C4) eingesetzt. Tantal-Kondensatoren haben, wie oben bereits beschrieben, gegenüber Elektrolytkondensatoren einen deutlich niedrigeren äquivalenten Serienwiderstand (ESR, Equivalent Series Resistance) und können daher benötigte Energie deutlich schneller bereitstellen, da sie sich schnell laden und entladen lassen.

Da die eingangsseitige Glättung und der lineare Festspannungsregler die Spannung bereits wesentlich stabilisieren und damit die Restwelligkeit deutlich verringern, fällt die Empfindlichkeit von Tantal-Kondensatoren gegenüber Ripplestrom-Überlastungen und schnellen Schaltflanken hier nicht mehr maßgeblich ins Gewicht.

Kontroll-LED-Anzeige

Zur Kontrolle der anliegenden 5 V-Ausgangsspannung wird eine grüne LED (D4) mit entsprechendem Vorwiderstand (R2) an den Ausgang geschaltet.

Signalaufbereitung (Hauptplatine)

Eckdaten

Die I/O-Eingänge des Mikrocontrollers haben einen Spannungsbereich von -0,5 V bis $V_{CC} + 0,5 \text{ V}$. Eingangsspannungen

- ▶ im Bereich von -0,5 V bis $0,3 \cdot V_{CC}$ werden sicher als Low-Pegel und
- ▶ im Bereich von $0,6 \cdot V_{CC}$ und $V_{CC} + 0,5 \text{ V}$ als High-Pegel

erkannt.

Bei einer Spannungsversorgung von $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ergibt sich somit

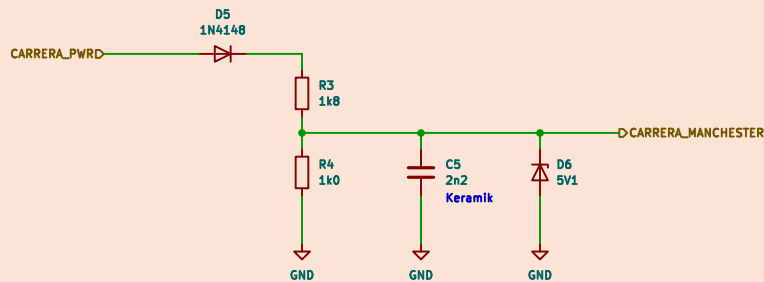
- ▶ eine maximale Eingangsspannung von 5,5 V,
- ▶ ein Low-Pegel zwischen -0,5 V und 1,5 V und
- ▶ ein High-Pegel zwischen 3,0 V und 5,5 V

Das CARRERA® digital 124/132 Datensignal hat eine Spannung von 14,8 V (132) und 18 V (124) und muss daher über einen Spannungsteiler auf die zulässige Eingangsspannung des verwendeten I/O-Pins des Mikrocontrollers reduziert werden.

Zusätzlich muss der I/O-Pin des Mikrocontrollers vor Spannungsspitzen über 5,5 V geschützt werden.

Schaltungsaufbau

Für den Teil der Signalaufbereitung ergibt sich folgender Schaltungsaufbau:



Schutzschaltungen

Um die Schaltung vor falscher Polung zu schützen, wird am Eingang in Durchlassrichtung eine 1N4148-Diode (D5) eingesetzt. Zudem verhindert die Diode am Eingang Rückwirkungen auf die Fahrspannung und das darauf modulierte Datensignal durch den nachfolgenden Tiefpass-Kondensator.

Eine 5V1-Zenerdiode¹⁵, (D6) welche in Sperrrichtung am I/O-Pin des Mikrocontrollers Richtung Ground geschaltet wird, schützt den Eingang des Mikrocontrollers vor Überspannungen.

***Hinweis:** Durch diese Zenerdiode ist grundsätzlich auch ein unveränderter Betrieb an einer CARRERA® digital 124 Rennbahn möglich. Allerdings fließt dabei ein unnötig hoher Strom über den 1k8-Widerstand und die Zenerdiode ab.*

Spannungsteiler

Zunächst wird die Eingangsspannung durch die Eingangsdiode um 0,7 V herabgesetzt. Der darauffolgende Spannungsteiler mit den Widerständen 1k8 (R3) und 1k0 (R4) der E12-Reihe teilt die Spannung weiter im Verhältnis 1,8:1,0 auf. Am Eingang des Mikrocontrollers liegt bei 14,8 V Fahrspannung ein High-Pegel von 5,04 V an.

***Hinweis:** Wird der Spannungsteiler für den dauerhaften Betrieb an einer CARRERA® digital 124 Rennbahn mit einer Fahrspannung von 18 V angepasst, so muss auch die nachfolgende Berechnung des Kondensators entsprechend angepasst werden!*

Bei Betrieb an einer CARRERA® digital 124 Rennbahn mit 18 V Fahrspannung empfiehlt es sich daher, den 1k8 Widerstand gegen einen 2k7 Widerstand zu ersetzen. Dann liegt bei 18 V Fahrspannung ein High-Pegel von 4,68 V am Eingang des Mikrocontrollers an. Dies ist noch ausreichend, um ein High-Signal am Eingang sicher zu erkennen.

¹⁵ Zenerdiode: <https://de.wikipedia.org/wiki/Z-Diode>

Filter

Zur Filterung hochfrequenter Störungen des Eingangssignals am Mikrocontroller wird ein Kondensator vom Eingangssignal gegen Ground geschaltet. Dieser bildet zusammen mit dem Spannungsteiler einen Tiefpass¹⁶.

Die Grenzfrequenz¹⁷ (-3 dB) des Tiefpasses soll bei etwa der 10-fachen Frequenz des Nutzsignals liegen. Da die Übertragung des Manchester-Codes mit 10 kHz erfolgt, berechnet sich der Filterkondensator für eine Grenzfrequenz von 100 kHz wie folgt:

$$C_g = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times f_g}$$

Gemäß dem Thévenin-Theorem¹⁸ werden für die Wechselstromanalyse Spannungsquellen kurzgeschlossen und Stromquellen geöffnet. Damit sind die Widerstände des Spannungsteilers für die Frequenzanalyse als Parallelschaltung zu betrachten.

Für den Widerstand R_p ergibt sich somit:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{1,8 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{1,0 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{1,556 \text{ k}\Omega} \Rightarrow R_p = 643 \text{ }\Omega$$

Nun lässt sich der Filterkondensator (C_5) wie folgt berechnen:

$$C_5 = C_g = \frac{1}{2 \times \pi \times R_p \times f_g} = \frac{1}{2 \times \pi \times 643 \text{ }\Omega \times 100 \text{ kHz}} = 2,4 \text{ nF}$$

Für eine genauere Berechnung des Tiefpasses müssten zusätzlich der Eingangswiderstand und die Eingangskapazität des Mikrocontrollers sowie die entsprechenden Eigenschaften der Zenerdiode berücksichtigt werden. Für diesen Anwendungszweck werden diese Abweichungen jedoch in Kauf genommen.

Unter Berücksichtigung verfügbarer Kondensatoren gemäß der E6-Reihe wird für C_5 ein Keramikkondensator mit einer Kapazität von 2,2 nF ausgewählt.

Daraus ergibt sich eine Grenzfrequenz von:

$$f_g = \frac{1}{2 \times \pi \times R_p \times C_5} = \frac{1}{2 \times \pi \times 643 \text{ }\Omega \times 2,2 \text{ nF}} = 112 \text{ kHz}$$

¹⁶ Tiefpass: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tiefpass>

¹⁷ Grenzfrequenz: <https://de.wikipedia.org/wiki/Grenzfrequenz>

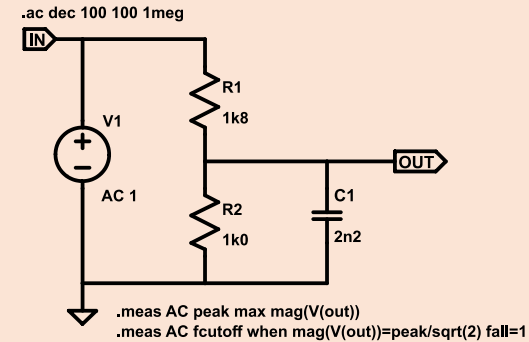
¹⁸ Thévenin-Theorem: <https://de.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9venin-Theorem>

LTspice Simulation¹⁹

Die LTspice-Simulation des Filters bestätigt die berechnete Grenzfrequenz.

Ltspice Simulation - Eingangsfilter - Dämpfung

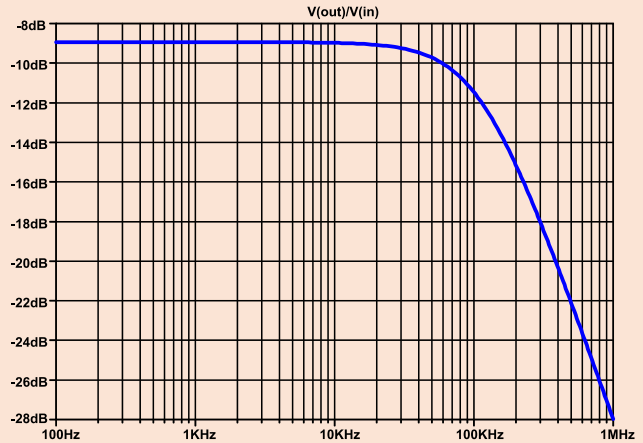
Schaltung und Simulation



Messwerte

peak: MAX(mag(v(out)))=(-3.4294e-06dB,0°) FROM 100 TO 1e+06
 fcutoff: mag(v(out))=peak/sqrt(2) AT 112536

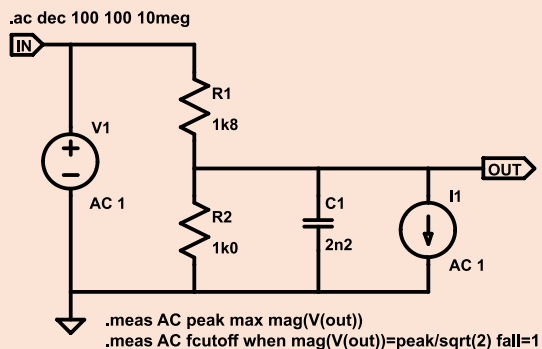
Kennlinie



Die Impedanz am Ausgang liegt, wie berechnet, bei 643 Ohm und nimmt ab 100 kHz deutlich ab. Bei Erreichen der Eckfrequenz liegt die Impedanz bei 454 Ohm und geht mit steigender Frequenz weiter gegen null.

Ltspice Simulation - Eingangsfilter - Impedanz

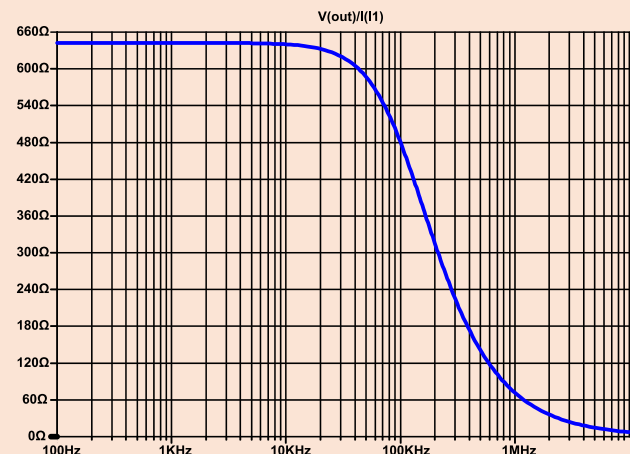
Schaltung und Simulation



Messwerte

peak: MAX(mag(v(out)))=(-3.4294e-06dB,0°) FROM 100 TO 1e+06
 fcutoff: mag(v(out))=peak/sqrt(2) AT 112536

Kennlinie



¹⁹ LTspice: <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

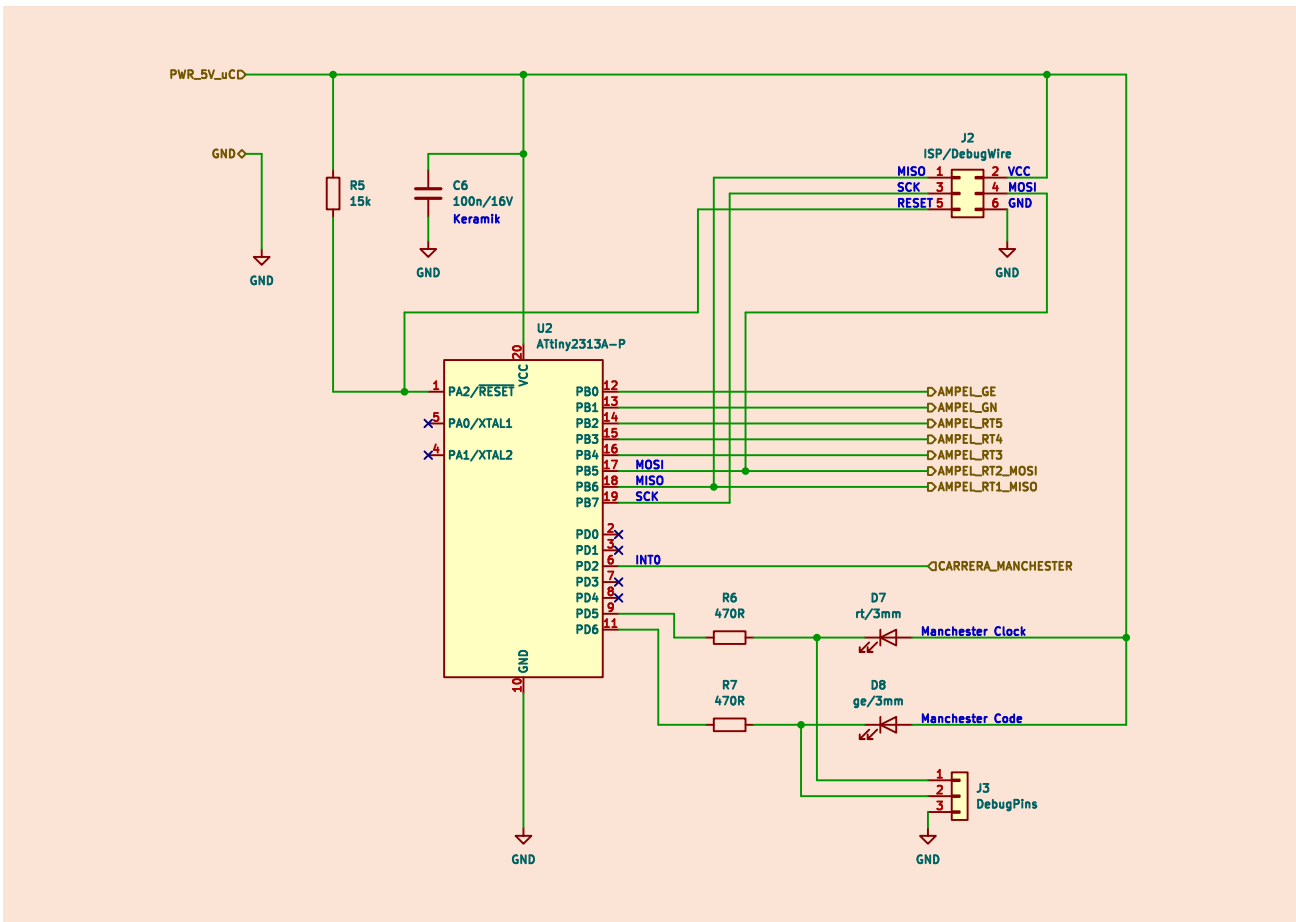
Mikrocontroller (Hauptplatine)

Eckdaten

Das Herzstück ist der Microchip AVR®-Mikrocontroller ATtiny2313²⁰, welcher mit der eigens dafür entwickelten Assembler-Software²¹ die Dekodierung und Auswertung des CARRERA® digital 124/132 Datensignales sowie die Steuerung der LED-Anzeigen der Startampel „Bären(n)keller“ übernimmt. Für den Systemtakt wird der interne Oszillator verwendet, wodurch eine separate Quarz-Beschaltung entfällt.

Hinweis: Für die Assembler-Software wurde eine eigene Software-Dokumentation erstellt, auf die hier für Informationen zur Software verwiesen wird.

Schaltungsaufbau



Stromversorgung

Der Mikrocontroller erhält über den linearen Festspannungsregler der Hauptplatine seine 5 V-Versorgungsspannung. Ein Blockkondensator²² (C6) von 100 nF zwischen V_{CC} und Ground direkt am Mikrocontroller sorgt dafür, dass Störungen durch impulsweise sehr hohe Ströme frühzeitig abgeblockt werden und sich nicht störend auf den Rest der Schaltung ausbreiten.

²⁰ ATtiny2313: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATtiny2313>

²¹ Assembler: <https://de.wikipedia.org/wiki/Assemblersprache>

²² Blockkondensator: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blockkondensator>

ISP und debugWIRE

Die Schnittstellen für die In-System-Programmierung²³ (ISP) und zur Fehlersuche (debugWIRE²⁴) werden über eine Pfostensteckverbindung so herausgeführt, dass ein einfaches Programmieren und Debuggen komfortabel möglich sind. Hierzu wird der Programmieradapter Microchip Atmel ICE²⁵ verwendet.

Selbstverständlich kann dies auch mit anderen ISP- und debugWIRE-kompatiblen Programmieradaptern erfolgen, die von der verwendeten Programmiersoftware unterstützt werden.

Pull-up-Widerstand für Reset-PIN

Der Reset-PIN wird zusätzlich zum relativ hochohmigen internen Pull-up-Widerstand mit einem externen Pull-up-Widerstand von 15 kOhm gegen V_{CC} beschaltet. So wird sichergestellt, dass der Mikrocontroller nicht durch Einstreuung von Störsignalen ungewollt ein Reset-Signal erhält. Weiterhin ist der Pull-up-Widerstand (R15) mit 15 kOhm ausreichend hochohmig, damit der Programmieradapter am ISP/debugWIRE die Reset-Funktion sicher auslösen kann.

Debug-PINs und -LEDs

Zur Kontrolle und Fehlersuche werden zwei I/O-Ausgänge als Debug-PINs (J3) für Messungen herausgeführt und zur optischen Signalisierung mit LEDs beschaltet. Um Beschädigungen durch versehentliche Kurzschlüsse bei Messungen zu vermeiden, erfolgt der Abgriff der herausgeführten Debug-PINs jeweils im Spannungsteiler zwischen der jeweiligen LED (D7, D8) und dem Vorwiderstand (R7, R8).

Dabei wird die LED mit der Anode an V_{CC} angeschlossen und mit der Kathode über einen Vorwiderstand an den I/O-Ausgang des Mikrocontrollers. Die jeweiligen Debug-PINs werden zwischen der Kathode der LED und dem Vorwiderstand abgegriffen. Bei einem versehentlichen Kurzschluss über die Messleitung wird der Strom, welcher aus oder in den Mikrocontroller fließt, über den Vorwiderstand der LED begrenzt.

LED-Anzeige (Displayplatine)

Eckdaten

Die LED-Anzeige oder Displayplatine wird rückseitig über Pfostenverbinder mit der Hauptplatine verbunden und bildet so eine kompakte Einheit. Zur Stromversorgung der LEDs wird die Fahrspannung der CARRERA® digital 124/132 verwendet.

Die LED-Anzeige der STARTAMPEL „Bären(n)keller“ besteht aus:

- ▶ 5 roten LEDs, jeweils 2 in Reihe geschaltet, für die Startphase
- ▶ 4 grünen LEDs, in Reihe geschaltet, für den Rennbetrieb
- ▶ 4 gelben LEDs, in Reihe geschaltet, für die Pace-Car-/Safety-Car-Phase

Diese werden durch den Mikrocontroller über das 7-fach-Darlington-Transistor-Array ULN2003A angesteuert.

²³ In-System-Programmierung: <https://de.wikipedia.org/wiki/In-System-Programmierung>

²⁴ debugWire: <https://de.wikipedia.org/wiki/DebugWIRE>

²⁵ Atmel ICE: <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/atatmel-ice>

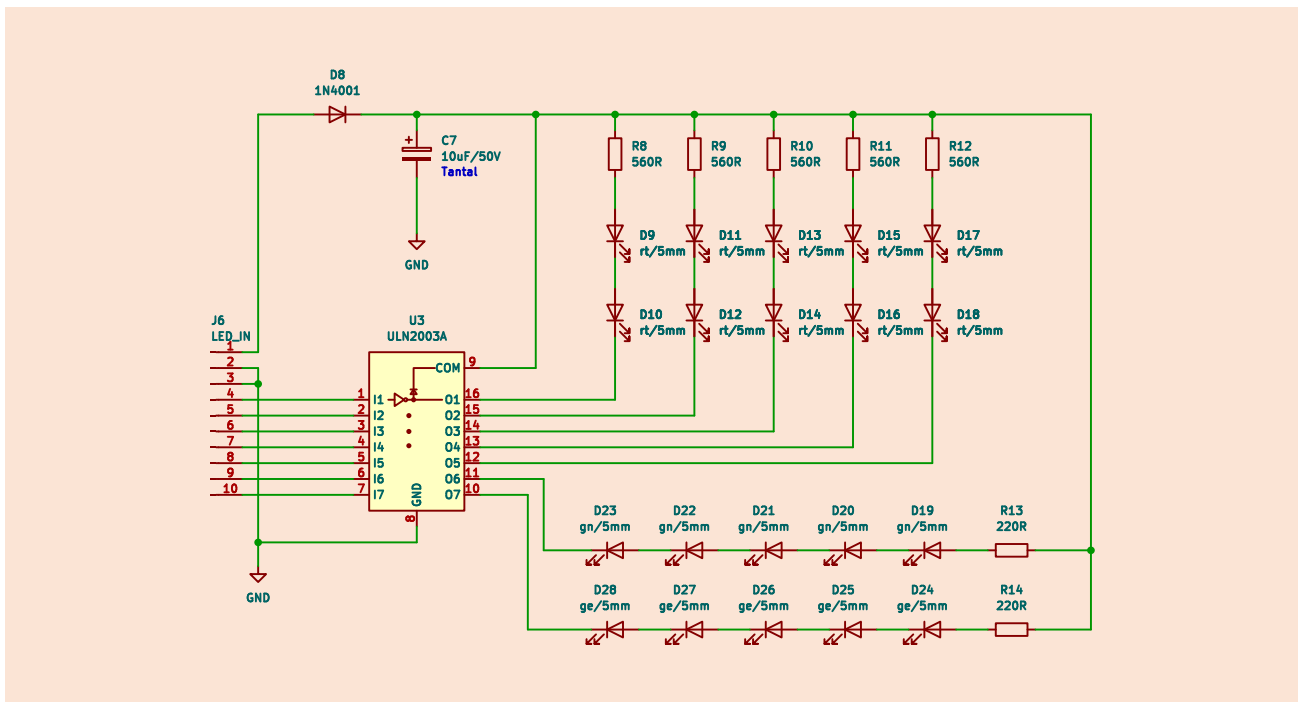
Zur Ermittlung des Strombedarfes werden folgende Komponenten berücksichtigt:

Nr.	Komponente	Strombedarf
1	5 Spalten, je 2 in Reihe geschaltete rote LEDs	5x 10 mA = 50 mA
2	1 Reihe mit 4 in Reihe geschalteten grüne LEDs	10 mA
3	1 Reihe mit 4 in Reihe geschalteten gelben LEDs	10 mA
Maximaler Gesamtstrombedarf:		70 mA

Unter Berücksichtigung, dass nicht alle LEDs gleichzeitig aktiv sein werden, wird der ermittelte maximale Gesamtstrombedarf im realen Betrieb nicht erreicht. Der maximale Strom im Regelbetrieb fließt, wenn alle roten LEDs eingeschaltet sind. Zu diesem Zeitpunkt sind die grünen und gelben LEDs nicht aktiv. Der ermittelte Strombedarf im Regelbetrieb wird bei maximal 50 mA liegen. Dies tritt ein, wenn durch die Startampel „Bären(n)keller“ signalisiert wird, dass die Rennstrecke aktuell gesperrt ist (Chaos) oder bei Rennvorbereitung und am Ende der Startsequenz.

Schaltungsaufbau

Es ergibt sich folgender Schaltungsaufbau für den Teil der Displayplatine:



Schutzschaltungen

Um die Schaltung vor falscher Polung zu schützen, wird am Eingang in Durchlassrichtung eine 1N4001-Diode (D8) eingesetzt. Zudem verhindert die Diode am Eingang Rückwirkungen auf die Fahrspannung und das darauf modulierte Datensignal.

Pufferkondensator

Um eine möglichst stabile Versorgungsspannung zu gewährleisten, wird als Pufferkondensator ein 10 μF Tantal-Kondensator (C7) eingesetzt, welcher die Spannungseinbrüche aufgrund des auf die Fahrspannung modulierten Datensignals überbrückt. Tantal-Kondensatoren haben gegenüber Elektrolytkondensatoren einen deutlich niedrigeren äquivalenten Serienwiderstand (ESR, Equivalent Series Resistance) und können daher benötigte Energie deutlich schneller bereitstellen, da sie sich schnell laden und entladen lassen.

Wie oben bereits beschrieben, sind Tantal-Kondensatoren teurer und empfindlicher gegenüber Ripplestromüberlastungen und schnellen Schaltflanken. Aufgrund des Vorteils eines niedrigeren ESR wurde hier dennoch entschieden, einen Tantal-Kondensator zu verwenden, um die LEDs jederzeit mit ausreichend Energie versorgen zu können.

Darlington-Array

Die Eingänge des Darlington²⁶-Arrays (U3) werden über Pfostenverbinder mit den Ausgängen des Mikrocontrollers verbunden. Der gemeinsame Anschluss (COM) der Freilaufdioden des ULN2003A²⁷ müsste zwingend nur bei induktiven Lasten an V_{CC} angeschlossen werden. Aufgrund der Vollständigkeit und um mögliche Störungen abzuleiten, wurde der COM-Anschluss hier trotz ausschließlich ohmscher Lasten mit V_{CC} verbunden.

LEDs

Die LEDs (D9-D23) werden über die entsprechenden Vorwiderstände (R8-R14) mit der gepufferten Fahrspannung und über den jeweils vorgesehenen Ausgang des Darlington-Arrays mit Ground verbunden.

²⁶ Darlington-Schaltung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Darlington-Schaltung>

²⁷ Texas Instruments ULN2003A: <https://www.ti.com/product/de-de/ULN2003A>

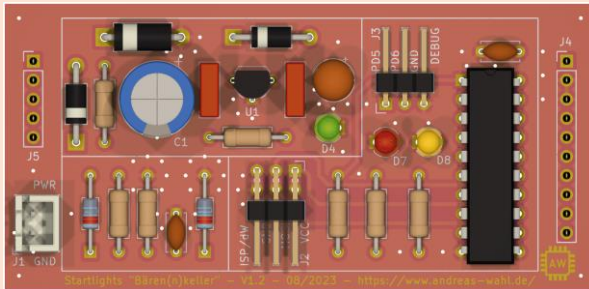
Platinen-Layout

Der Aufbau der Platine wurde so gewählt, dass die Bauteile zu den jeweiligen Funktionsblöcken (Spannungsversorgung, Signalaufbereitung, Mikrocontroller) logisch gruppiert sind. Die Funktionsblöcke sind deutlich zu erkennen.

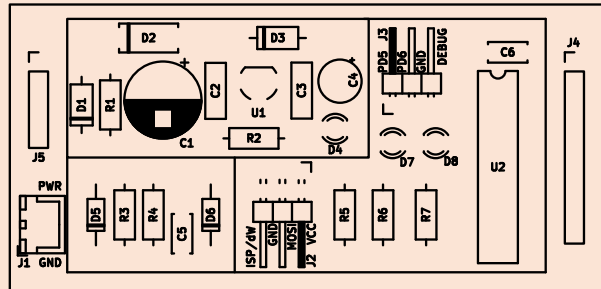
Bei der Leiterbahnführung wurde auf möglichst kurze Leiterbahnen unter Berücksichtigung des Stromflusses geachtet. Mittels Durchkontaktierungen wird für eine möglichst niederohmige Verbindung zum GND-Potential gesorgt, um insbesondere hochfrequente Störeinflüsse möglichst zu vermeiden bzw. deutlich zu verringern.

Hauptplatine (Mikrocontroller)

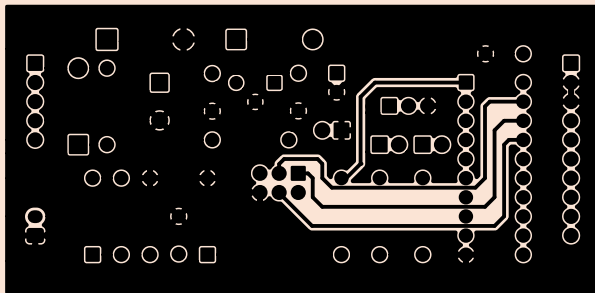
Hauptplatine (Mikrocontroller)



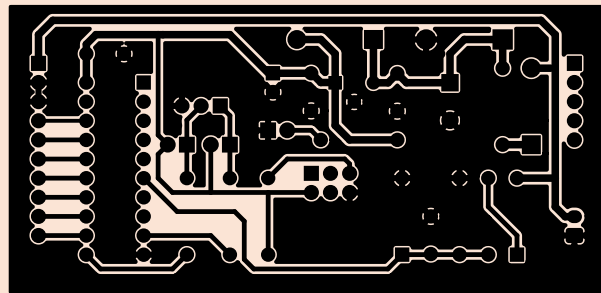
3d-Ansicht - TOP



Silkscreen - TOP



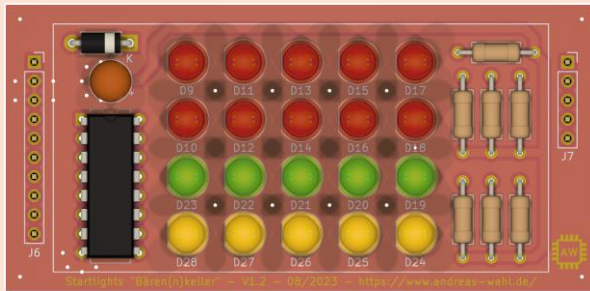
Cu-Layout - TOP



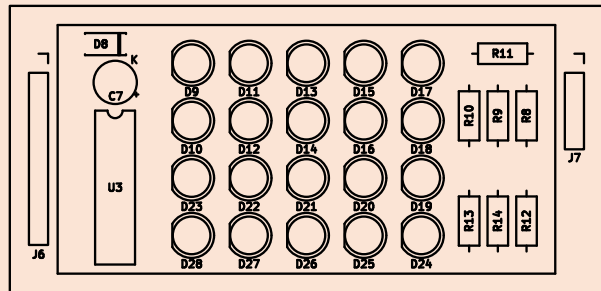
Cu-Layout - BOTTOM

Displayplatine (LED-Anzeige)

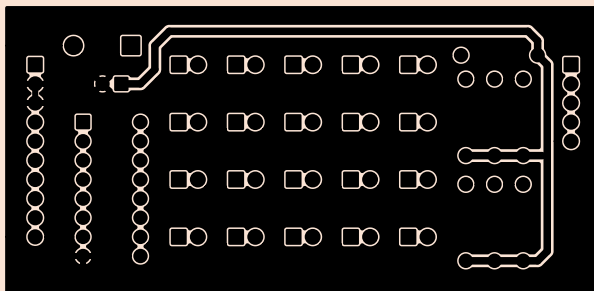
Displayplatine (LED-Anzeige)



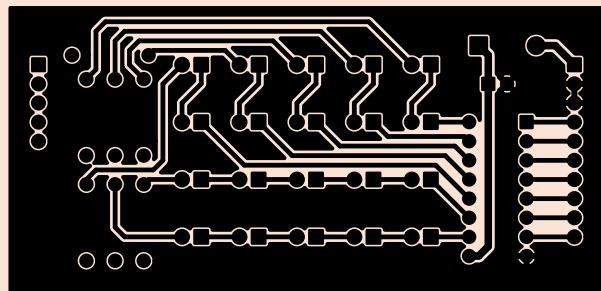
3d-Ansicht - TOP



Silkscreen - TOP



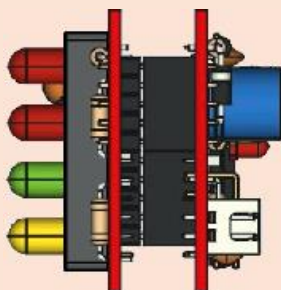
Cu-Layout - TOP



Cu-Layout - BOTTOM

Hauptplatine (Mikrocontroller) und Displayplatine (LED-Anzeige) (montiert)

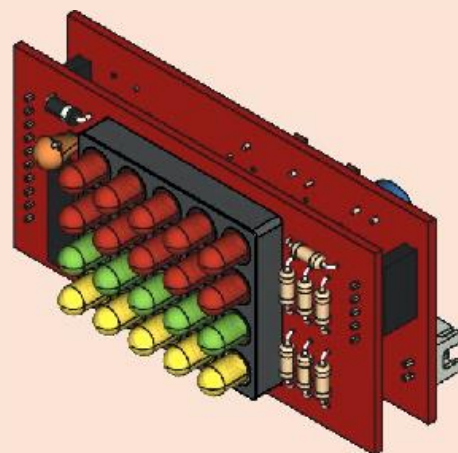
Hauptplatine (Microcontroller) und Display-Platine (LED-Anzeige)



Seitenansicht



Draufsicht



Isometrisch

Die montierten Ansichten wurden mit FreeCAD²⁸ und KicadStepUp Workbench²⁹ erzeugt.

²⁸ FreeCAD: Parametrischer 3D-Modellierer, <https://www.freecad.org/>

²⁹ KicadStepUp Workbench: https://wiki.freecad.org/KicadStepUp_Workbench

Qualitätsanforderungen

Für die nachfolgende Messungen wurde das Oszilloskop SIGLENT SDS-1204X-E³⁰ verwendet. Bei allen Messungen wurden die Masse mit der Ground Spring am Tastkopf direkt in Signálnähe abgegriffen, um Einstreuungen durch Erdschleifen der Masse-Leitungen zu vermeiden. Dies ist insbesondere bei der Messung der Restwelligkeit³¹ (Ripple) von Bedeutung, da hier in Größenordnungen von wenigen Millivolt gemessen wird.

5 V-Spannungsversorgung

Zunächst wurde die 5 V-Spannungsversorgung in der Gleichstrombetrachtung gemessen. Für die Zeitbasis wurden 100 μ s/Div. gewählt, um eventuelle Einflüsse durch das 10 kHz-Datensignal direkt zu erkennen. Der Messbereich für die Spannung liegt bei 2,00 V/Div. und wurde zur Darstellung der Messergebnisse um -6 V nach unten verschoben.

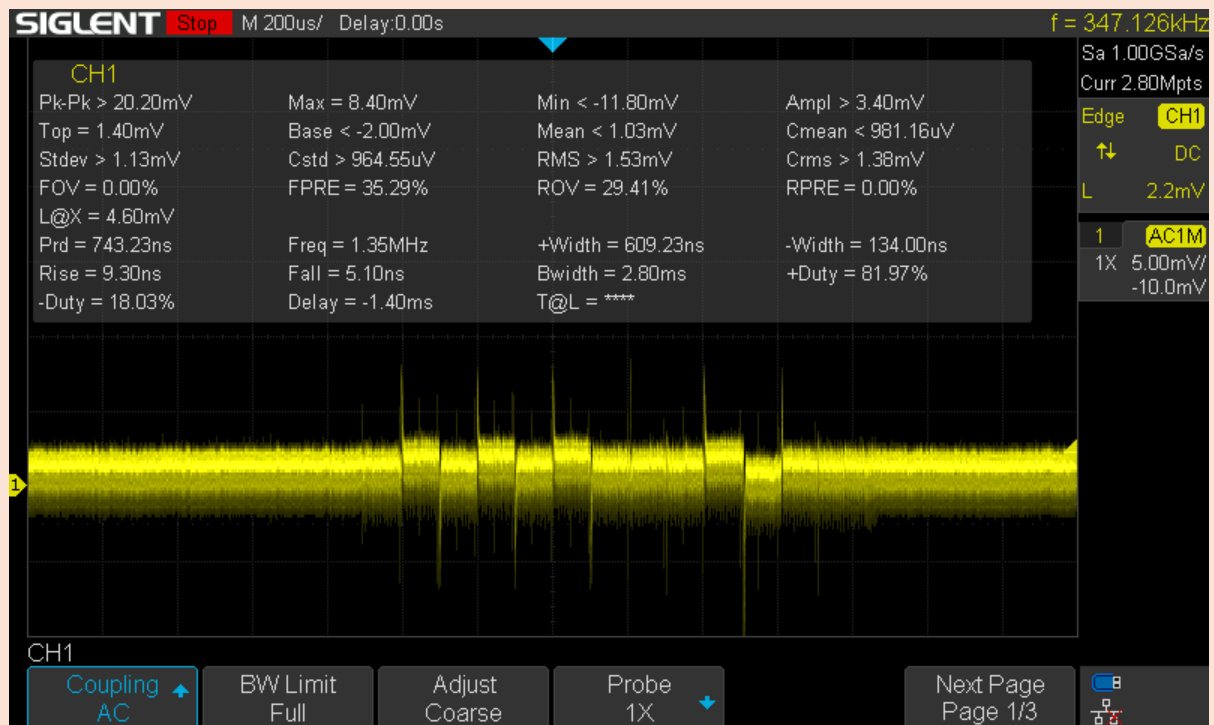


Die Messung zeigt eine konstante Spannungsversorgung von 4,87 V mit einer durchschnittlichen Restwelligkeit von 55,82 mV. Einzelne Peaks wurden mit +90 mV und -70 mV festgestellt.

Im Wechselstrommodus (AC) lässt sich der Ripple näher betrachten. Die Zeitbasis wurde auf 200 μ s/Div. erhöht, um einen größeren Zeitausschnitt zu betrachten. Für den Messbereich der Spannung wurden 5,00 mV/Div. gewählt und zur Anzeige der Messdaten um -10,0 mV nach unten verschoben.

³⁰ SIGLENT SDS1204X-E: <https://www.siglent.eu/product/1139259/siglent-sds1204x-e-200mhz-four-channel-oscilloscope>

³¹ Restwelligkeit: <https://de.wikipedia.org/wiki/Restwelligkeit>



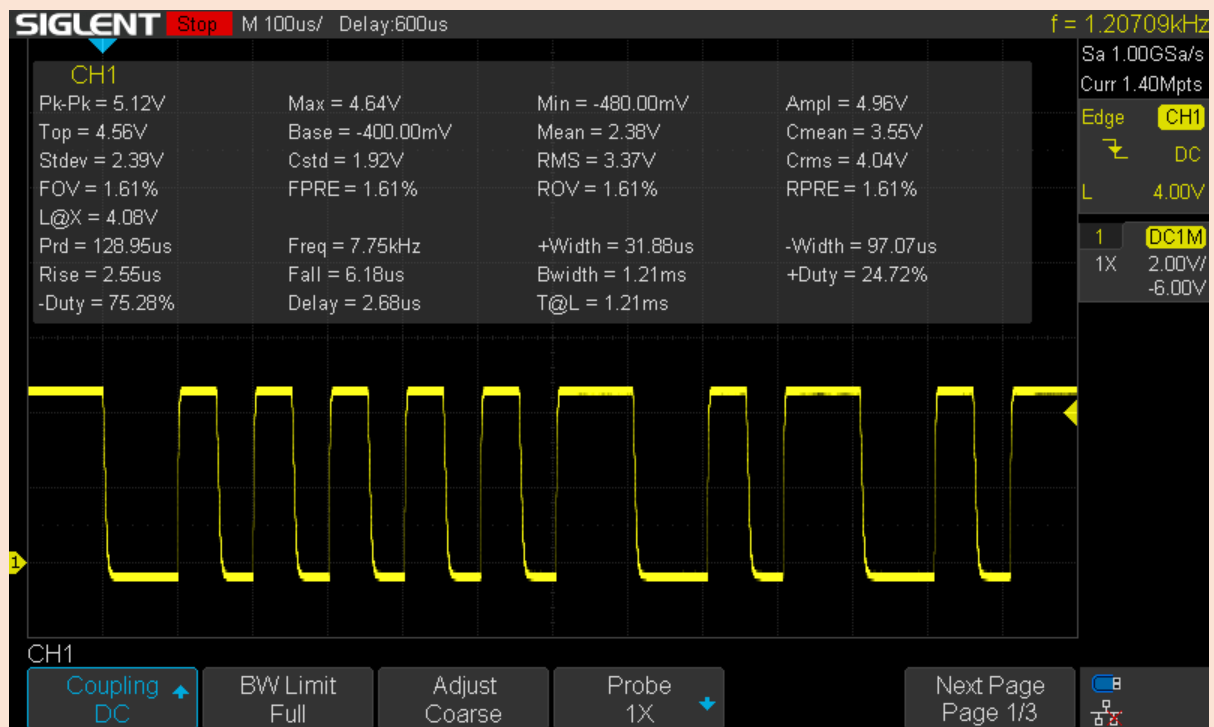
Zu erkennen sind die trotz Glättung und Siebung verbliebenen Störimpulse, die durch das der auf die Fahrspannung modulierte, steiflankige Datensignal verursacht werden. Diese werden hier mit einer Spitzen-Spitzen-Spannung von 20,2 mV_{Pk-Pk} gemessen. Der Maximalwert der Störimpulse liegt bei +8,4 mV_{Max}, der Minimalwert der Störimpulse bei -11,80 mV_{Min}.

Die durchschnittliche Restwelligkeit beträgt 3,4mV_{Ampl} und bewegt sich im Bereich von +1,4 mV_{Top} bis -2,0 mV_{Base}.

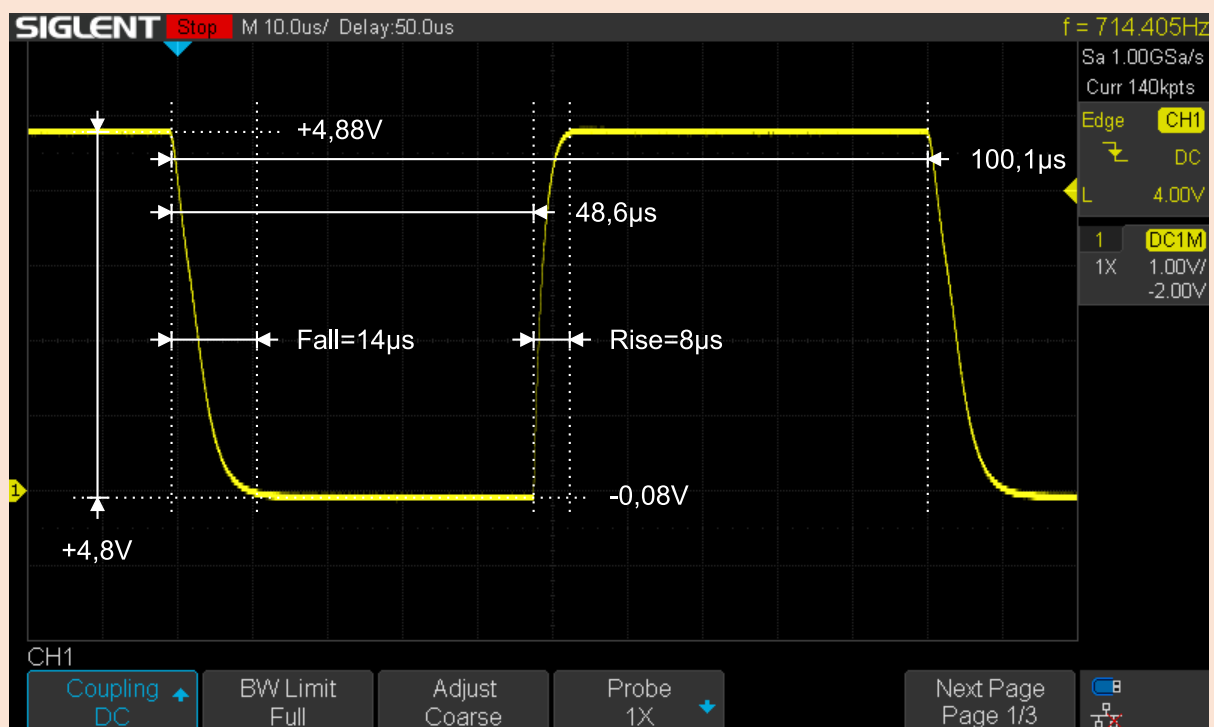
Für diesen Anwendungsfall der STARTAMPEL „Bären(n)keller“ wird die erreichte Qualität der Spannungsversorgung als mehr als ausreichend erachtet.

Datensignal

Ein Blick auf ein komplettes Control-Unit-Datenpaket mit einer Länge von 12 Bit, gemessen am Filterkondensator kurz vor dem Eingangs-Pin des Mikrocontrollers.



Nachfolgend eine Detailbetrachtung eines einzelnen Bits (hier 0, steigende Flanke).



Die Messdaten (weiß) wurden nachträglich mit einem Grafikprogramm ergänzt.

Technische Daten

Funktionen³²:

- ▷ Startsequenz
- ▷ Pace Car - Anzeige
- ▷ Frühstart - Anzeige
- ▷ Chaos-/Stop - Anzeige
- ▷ Renn-Ende/Sieger - Anzeige³³

Spannungsversorgung (aus Fahrleiter):

digital 132 14,8 V
 digital 124 18,0 V

Stromaufnahme @ 14,8V (digital 132):

maximal: 110 mA
 bei Fahrbetrieb (grün) 40 mA
 bei Start/Chaos (alle rot) 109 mA

Stromaufnahme @ 18V (digital 124):

maximal: 135 mA
 bei Fahrbetrieb (grün) 50 mA
 bei Start/Chaos (alle rot) 132 mA

Decoder:

Assembler Software Decoder für
 Microchip/Atmel AVR ATtiny 2313
 Reaktionszeit: 125 µs

Abmessungen:

Höhe: 161 cm
 Tiefe: 44 cm
 Breite bei 2 Spuren: 228 cm
 Breite bei 3 Spuren: 327 cm
 Breite bei 4 Spuren: 426 cm

³² In Verbindung mit der CARRERA® Control Unit
 (Art.-Nr.: 20030352).

³³ Zusätzlich mit dem CARRERA® Lap Counter
 (Art.-Nr.: 20030355).

Glossar

arc42	Frei verfügbares (Open Source) Konzept für die Entwicklung, Dokumentation und zur Kommunikation von Softwareprojekten. https://arc42.org/
Assembler	Maschinenorientierte Programmiersprache https://de.wikipedia.org/wiki/Assemblersprache
AVR® Mikrocontroller	8 Bit-Mikrocontroller-Familie des US-amerikanischen Herstellers Microchip, vormals Atmel. https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus https://de.wikipedia.org/wiki/Microchip AVR
Control-Unit	Zentraleinheit zur Bedienung, Steuerung und Stromversorgung der CARRERA® digital 124/132 Modellrennbahn. CARRERA® Control-Unit (Art.-Nr. 20030352) https://carrera-toys.com/de/product/20030352-control-unit
debugWire	Serielles Übertragungsprotokoll von Atmel (Microchip) für die Programmierung und Fehlersuche bei AVR®-Mikrocontrollern. https://de.wikipedia.org/wiki/DebugWIRE
ISP	Schnittstelle zur Programmierung von AVR®-Mikrocontrollern (In-System Programming).
Lap-Counter	Renncomputer zur Zeitmessung und Zählung der Rennrunden und Steuerung von Rennen als Ergänzung zur CARRERA® Control-Unit. CARRERA® Lap-Counter (Art.-Nr. 20030355) https://carrera-toys.com/de/product/20030355-lap-counter
Oszilloskop	Elektronisches Messgerät, welches den zeitlichen Verlauf von elektrischen Spannungen optisch darstellen kann. https://de.wikipedia.org/wiki/Oszilloskop
SRAM	Static random-access memory https://de.wikipedia.org/wiki/Static_random-access_memory Arbeitsspeicher des Mikrocontrollers
Startampel Startlight	Startampel zur Signalisierung der Startfreigabe für den stehenden Start im Motorsport. https://de.wikipedia.org/wiki/Start_(Motorsport) CARRERA® Startlights (Art.-Nr. 20030354) https://carrera-toys.com/product/20030354-startlight
Startlight „Bären(n)keller“	Eigenentwicklung einer Startampel mit erweitertem Funktionsumfang. (Start-Sequenz, Früh-Start, Pace-Car, Chaos, Sieger,...) In diesem Dokument beschrieben.

Ergänzende Informationen

Carrera Toys GmbH

▷ **CARRERA Toys GmbH**

<https://carrera-toys.com/>

▷ **CARRERA® digital 132**

<https://carrera-toys.com/digital-132>

▷ **CARRERA® digital 124**

<https://carrera-toys.com/digital-124>

▷ **CARRERA® Control-Unit (20030352)**

<https://carrera-toys.com/product/20030352-control-unit>

▷ **CARRERA® Handregler/Controller (20030340)**

<https://carrera-toys.com/product/20030340-digital-132-124-handregler>

▷ **CARRERA® Startlight (20030354)**

<https://carrera-toys.com/product/20030354-startlight>

▷ **CARRERA® Lap-Counter (20030355)**

<https://carrera-toys.com/product/20030355-lap-counter>

▷ **CARRERA® Position Tower (20030357)**

<https://carrera-toys.com/product/20030357-position-tower>

▷ **CARRERA® Adapter Unit (20030360)**

<https://carrera-toys.com/de/product/20030360-adapter-unit>

Entwickler-Tools

▷ **KiCAD EDA Suite**

Schaltplan und Platinenlayout

<https://www.kicad.org/>

▷ **Analog Devices LTspice**

Simulation von elektronischen Schaltungen

<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

▷ **Microchip Studio**

Software-Entwicklung für Mikrocontroller ATmega/ATtiny in Assembler und C

<https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/microchip-studio>

▷ **FreeCAD**

Parametrische 3D-Konstruktionen

<https://www.freecadweb.org/>

▷ **Ultimaker Cura**

3D printing Software / Slicer

<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>

Ähnliche Projekte

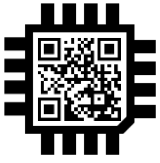
▷ **Dipl.-Ing. Peter Niehues**

<http://www.wasserstoffe.de/carrera-hacks/>

▷ **Stephan Heß**

<http://slotbaer.de/carrera-digital-124-132.html>

Entwickler und Herausgeber



andreas wahl

Informationstechnik – Kommunikationstechnik – Elektronik
innovativ + kompetent + effizient

<https://www.andreas-wahl.de/>

STARTAMPEL „Bären(n)Keller“ auf GitHub:

▷ Software

<https://github.com/Andreas-Wahl/Startlight-SW>

▷ Hardware

<https://github.com/Andreas-Wahl/Startlight-HW>

▷ Gehäuse

<https://github.com/Andreas-Wahl/Startlight-3D>

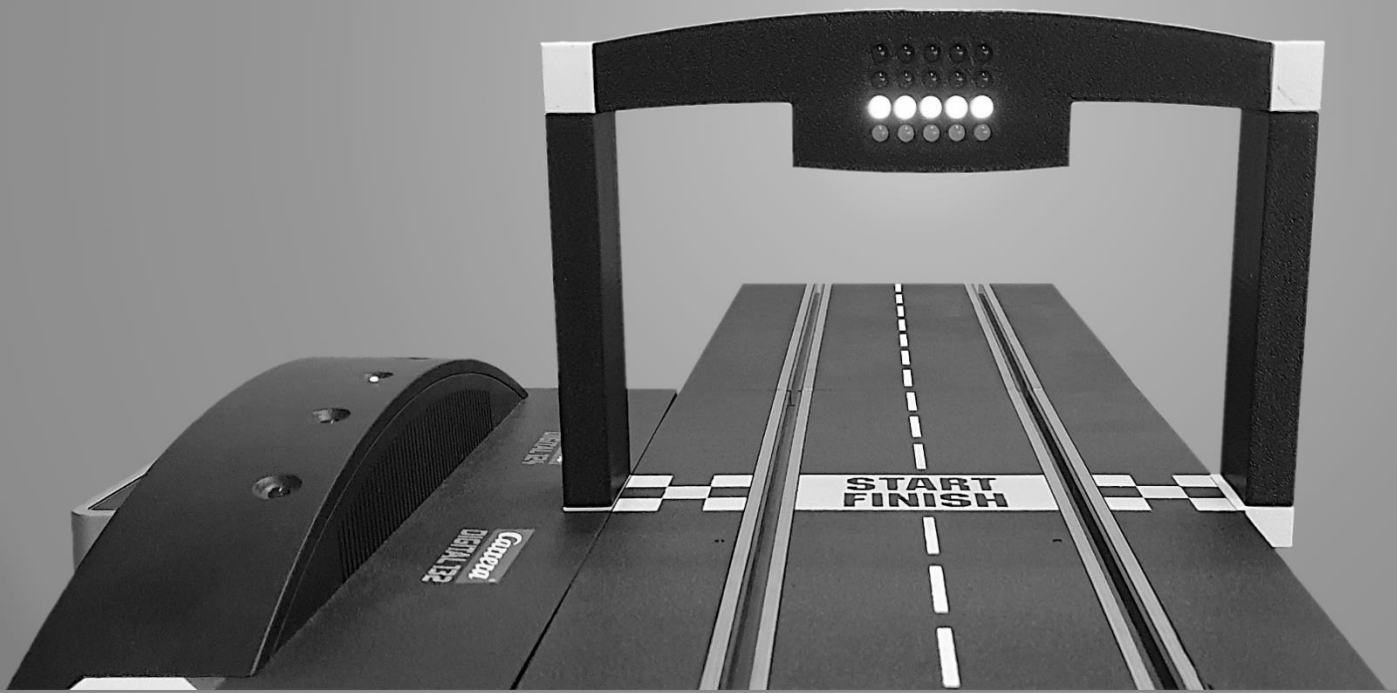
STARTAMPEL – Bären(n)keller auf Thingiverse:

▷ Gehäuse

<https://www.thingiverse.com/thing:6443510>

▷ Stecker

<https://www.thingiverse.com/thing:6444956>



andreas wahl

Informationstechnik – Kommunikationstechnik – Elektronik
innovativ + kompetent + effizient