

Von der Schalttafel zur eigenen Steuerplatine

Wie aus Bluebaerrys Bordelektrik ein prüfbares
PELARON-Hardwarekonzept wird



WIE DAS ZU LESEN IST

Zweiundzwanzig Kapitel, eine Stimme

Das Software-Tagebuch erzählt, wie die PELARON App entstanden ist. Diese Dokumentation erzählt dasselbe für die Hardware: eine Steuerplatine, die zwischen die vorhandenen Wippschalter und die Verbraucher von Bluebaerry tritt, ohne die Schalter zu entmachten. Sie ist in der ersten Person geschrieben, weil die Entscheidungen meine sind — und weil ein Käufer wissen soll, warum etwas so gebaut ist und nicht anders. Die Zahlen darin sind gemessen, nicht geschätzt. Wo etwas entschieden, aber noch nicht nachgewiesen ist, steht das dabei. Der Schaltplan ist ein Entwurf ohne Freigabe; nichts hier ist eine Anleitung zum Einbau.

Die Schalter bleiben. Die wichtigen Systeme bleiben unabhängig. Und PELARON verbindet den Rest.

Ein paar Wörter vorab

- Wippschalter: die rastenden Kippschalter am Tableau, mit denen man Licht, Pumpe und Kühlschrank heute von Hand schaltet.
- Verbraucher: alles, was Strom aus der Batterie zieht — vom Kühlschrank bis zur Bilgepumpe.
- Relais: ein elektrisch betätigter Schalter auf der Platine, der den Strom zum Verbraucher freigibt oder trennt.
- Hauptrechner: der ESP32, ein kleiner Computer auf der Platine, der App, WLAN, LTE und Automatik bedient.
- Sicherheitscontroller: ein zweiter, viel kleinerer Rechner — hier U_SAFE genannt —, der nur die Schalter liest und die Ausgänge führt, unabhängig vom Hauptrechner.
- Lebenszeichen: ein regelmäßiges „ich lebe“ des Hauptrechners an den Sicherheitscontroller. Bleibt es aus, gelten wieder die Wippschalter.
- Wachhund: eine Schaltung, die einen hängenden Rechner selbst neu startet.
- Direktpfad: ein Stromweg von der Batterie zum Gerät mit eigener Sicherung und eigenem Schalter, an dem die Platine nichts schaltet, sondern höchstens misst.
- Netz: im Schaltplan eine Verbindung, die nur einen Namen trägt statt eines gezeichneten Drahtes; überall, wo der Name steht, ist dieselbe Leitung gemeint.
- KiCad: das Programm, mit dem der Schaltplan gezeichnet und geprüft wird.

INHALT

Zweiundzwanzig Kapitel

KAPITEL 1	Warum ich keine Funkmodule gekauft habe	4. September 2026	4
KAPITEL 2	Aus Linien werden Netze	5. und 6. September 2026	6
KAPITEL 3	Redundanz	7. September 2026	8
KAPITEL 4	Was passiert, wenn	18. September 2026, morgens	10
KAPITEL 5	Was „ein“ wirklich heißt	18. September 2026	12
KAPITEL 6	Die App vor der Platine	18. September 2026, mittags	14
KAPITEL 7	Was PELARON Control24 Pro nicht ist	Stand 18. September 2026	16
KAPITEL 8	Drei Blätter an einem Tag	19. September 2026	18
KAPITEL 9	Von zehn Blättern zu einer Platine	20. September 2026	20
KAPITEL 10	Fünf Löcher, vier Pins	21. September 2026, abends	23
KAPITEL 11	Die Nacht, die nichts brachte	22. und 23. September 2026	25
KAPITEL 12	Zwei Etagen	24. September 2026	27
KAPITEL 13	Ein Drittel Platz	25. September 2026	29
KAPITEL 14	Fertig zum Bestellen	26. bis 29. September 2026	31
KAPITEL 15	Teile, die es nicht gibt	29. September bis 1. Oktober 2026	33
KAPITEL 16	Lieber jetzt als später	30. September und 1. Oktober 2026	34
KAPITEL 17	Alles bestellt	2. bis 6. Oktober 2026	36
KAPITEL 18	Programme vor den Platinen	1. bis 8. Oktober 2026	38
KAPITEL 19	Die ersten Pakete	7. bis 9. Oktober 2026	41
KAPITEL 20	Kleiner und kompakter	10. bis 13. Oktober 2026	44
KAPITEL 21	Nicht raten	12. bis 14. Oktober 2026	46
KAPITEL 22	Warten auf die Platinen	15. bis 18. Oktober 2026	48

KAPITEL 1

Warum ich keine Funkmodule gekauft habe

4. September 2026

Mein Einfamilienhaus ist komplett smart. Ich habe mich daran gewöhnt, dass ein Haus auf mich reagiert. Irgendwann stand ich an Bord von Bluebaerry vor der Schalttafel, rund zwanzig rastende Wippschalter mit Sicherungen und Kontrollleuchten, und dachte: Warum kann das Boot das nicht?

Die erste Antwort wäre einfach gewesen. Man kauft für jeden Verbraucher ein kleines Funkmodul, klemmt es hinter den Schalter und steuert es mit einer App. Das gibt es fertig, das kostet nicht viel, und es wäre schnell erledigt gewesen.

Ich habe es nicht gemacht, und der Grund steht seitdem über allem, was ich an dieser Hardware entscheide:

Die manuelle Bedienung darf nicht verschwinden. Ein Boot ist kein Wohnzimmer. Wenn kein Telefon an Bord ist, wenn das WLAN ausfällt oder wenn die Software nicht läuft, muss ein Licht trotzdem mit einem Schalter angehen.

Zu Hause ist ein Ausfall ärgerlich. Auf See ist er etwas anderes. Und zwanzig einzelne Funkmodule, jedes mit eigener App, eigenem Akku und eigener Meinung darüber, was „an“ bedeutet, sind das Gegenteil von dem, was ich wollte: eine Stelle, die den Zustand des Bootes kennt.

Eine Platine statt zwanzig Kästchen

So entstand die Idee einer eigenen Steuerplatine. Ein Eingang aus der Batteriebank, vierundzwanzig schaltbare Ausgänge, eigene Versorgungen für Sensoren, Modem und Logik, Anschlüsse für NMEA 2000, für die Victron-Geräte über Bluetooth, für WLAN und LTE, dazu eine kleine Backup-Versorgung, damit die Platine einen Ausfall wenigstens noch melden kann.

Und gleichzeitig sollte PELARON einen Verbraucher auch aushalten können, wenn der Schalter auf Ein steht: bei Unterspannung zuerst die großen Verbraucher wie die Toilette, den Kühlschrank erst zuletzt, damit die Bank nicht leerläuft. Verbraucher sperren, Alarm senden — aber nie die Hand des Menschen am Schalter entmündigen.

Zwei Verbraucher hatte ich von Anfang an anders im Kopf. Die Standheizung darf man nicht einfach stromlos machen — sie braucht nach dem Abschalten einen Nachlauf, in dem das Gebläse den Brenner kühlt, sonst nimmt sie Schaden. Und die Bilgepumpe muss auch dann laufen, wenn sonst gar nichts mehr läuft. Beide bekamen deshalb einen eigenen Weg, an der Platine vorbei.

KiCad konnte ich gar nicht

Das muss ich ehrlich sagen: Am ersten Tag konnte ich das Programm, mit dem man Schaltpläne zeichnet, überhaupt nicht. KiCad ist mächtig und unnachgiebig, und die ersten Stunden waren ein ganz schöner Krampf. Jede Leitung muss genau am Anschlusspunkt eines Bauteils enden — nicht daneben, nicht knapp darüber. Nähe zählt nicht.

Nach einer gewissen Zeit hat es dann richtig Spaß gemacht. Man merkt, dass das Programm einen zwingt, sauber zu denken: Was gehört zur Versorgung, was zum Lastpfad, was zur Logik? Am Abend des ersten Tages gab es zwei fertige Blätter — den Eingangsschutz mit Rückstromschutz und Hauptsicherung, und die Spannungsversorgung mit dem Backup.

Der erste Hardwaretag brachte keine fertige Platine. Er brachte etwas Wichtigeres: eine klare Grenze zwischen Bordnetz, Lastpfad, Logik, Kommunikation und Backup.

Schon an diesem Tag habe ich mir aufgeschrieben, dass vor einer Bestellung echte Bauteile, Strompfade, Sicherungen, Wärme und Klemmen geprüft werden müssen. Ein Schaltplan, der auf dem Bildschirm gut aussieht, ist noch lange keine Platine, die man an eine Batteriebank hängen darf.

KAPITEL 2

Aus Linien werden Netze

5. und 6. September 2026

Am zweiten Tag wuchs der Plan sichtbar. Ein Blatt für die Controller, eines für die Victron-Geräte über Bluetooth, eines für NMEA 2000, eines für die vierundzwanzig Lastkanäle und eines für die Wippschalter mit ihren Kontrollleuchten. Am Abend stand die Struktur der Platine auf dem Bildschirm.

Das Wichtigste, was ich an diesem Tag verstanden habe, klingt banal und ist es nicht: Ein Relais hat zwei Seiten. Die Spule, die das Relais anzieht, braucht dauerhaft ihre kleine Versorgung aus der Logik. Der Kontakt, den die Spule schließt, schaltet den dicken, abgesicherten Lastpfad zum Verbraucher. Beides muss getrennt gezeichnet, getrennt versorgt und getrennt abgesichert sein. Wer das vermischt, hat am Ende Laststrom in der Logik.

Ein Netz ist eine Leitung mit Namen

In einem Schaltplan zeichnet man nicht jede Verbindung als Strich. Über zehn Blätter hinweg wäre das ein Gestrüpp. Stattdessen gibt man einer Verbindung einen Namen, und überall, wo dieser Name steht, ist dieselbe Leitung gemeint. So ein benanntes Ding heißt Netz.

Merksatz vom fünften September: Ein sauber benanntes Netz ist genauso real wie eine sichtbar gezeichnete Leitung. Deshalb müssen Schreibweise, Art des Namens und der Anschlusspunkt exakt stimmen.

Das klingt nach Buchhaltung, und es ist Buchhaltung. Ein Name mit einem Tippfehler ist ein anderes Netz. Ein Name, der nur auf einem Blatt gilt, verbindet nicht mit dem nächsten Blatt. Ein Text, der über einer Leitung steht, ist nicht automatisch mit ihr verbunden — es zählt der kleine Ankerpunkt, nicht der Eindruck.

Der Prüftag

Der dritte Tag war kein Bautag, sondern ein Prüftag. KiCad hat eine eingebaute Prüfung, die jeden Anschluss und jedes Netz gegen die Regeln hält und eine Liste ausgibt. Beim ersten Lauf standen darin über vierzehnhundert Meldungen.

Ich habe den Plan nicht neu gezeichnet, sondern bin die Liste durchgegangen: Verbindung für Verbindung, Anschluss für Anschluss, Name für Name. Auf dem Versorgungsblatt waren es Schreibweisen und Anker, die nicht saßen. Auf dem Eingangsblatt war ein Schutzbauteil falsch herum eingezeichnet. Und der Lastbus und das geschützte Netz für die Elektronik hingen an derselben Stelle — vor beziehungsweise hinter der Hauptsicherung mussten sie getrennt werden, sonst wäre die Sicherung per Namen überbrückt gewesen.

Zwei Stellen waren ernster als der Rest. Ein Netz der Backup-Versorgung war mit dem Minus der Batterie zusammengefallen — das wäre ein Kurzschluss gewesen. Und die Freigabe des Backup-Laders war durch eine senkrechte Leitung überbrückt, die dort nicht hingehörte. Beides sah auf dem Bildschirm harmlos aus. Beides hätte auf einer gelöteten Platine Schaden gemacht.

Am Abend war die Zahl der Fehler in der Liste auf einundsiebzig gesunken. Das ist nicht der Fortschritt, der zählt.

Der Fortschritt des Tages ist nicht „weniger rote Marker“. Entscheidend ist, dass Sicherungsgrenzen, Polarität und Netznamen jetzt näher an dem liegen, was elektrisch gemeint ist.

Was diese drei Tage mich gelehrt haben: Hardwareentwicklung ist an dieser Stelle nicht das Zeichnen schöner Leitungen. Sie ist das geduldige Beweisen, dass jede Leitung das richtige Netz, den richtigen Anschluss und die richtige Aufgabe hat. Ein sauberer Schaltplan ist die erste Dokumentation des späteren Geräts — und die erste Stelle, an der man einen Fehler noch kostenlos findet.

KAPITEL 3

Redundanz

7. September 2026

Ich saß am Schreibtisch, nicht am Boot. Und ich wollte einfach eine Notfalloption haben, falls irgendetwas ausfällt. Redundanz nennt man das: Ein zweiter Weg, der übernimmt, wenn der erste nicht mehr geht. Der Anlass war das Blatt mit den Wippschaltern. Dort war zum ersten Mal eindeutig zu sehen, was die Platine aus den Schaltern macht: Sie sind im Entwurf keine Lastschalter mehr, sondern Signaleingänge. Nicht der Schalter schaltet den Kühlschrank, sondern ein Relais auf der Platine. Der Schalter teilt nur noch den Wunsch des Menschen mit.

Damit hängt der Kühlschrank plötzlich an der Software. Und genau an dieser Stelle wurde aus einer Frage des Schaltplans eine Frage der Architektur.

Der Satz „Ein Licht muss auch dann mit dem Schalter angehen, wenn die Software nicht läuft“ ist nur erfüllt, wenn etwas unabhängig vom Hauptrechner die Schalter liest und die Ausgänge führt.

Ein kleiner zweiter Rechner mit einem einzigen Programm

Der Hauptrechner der Platine ist ein ESP32, ein kleiner Computer, der App, WLAN, LTE, Automatik und Einstellungen bedient. Er ist der Teil, der Fehler haben wird — weil er der Teil ist, an dem am meisten programmiert wird.

Deshalb bekommt die Platine einen zweiten, viel kleineren Rechner, der nur eines kann: die Wippschalter lesen und die Ausgänge schalten. Ich nenne ihn U_SAFE, den Sicherheitscontroller. Sein Programm ist fest und begrenzt — je weniger es kann, desto weniger kann darin schiefgehen.

Zwischen beiden läuft ein Lebenszeichen, der Heartbeat. Der Hauptrechner sagt in kurzen Abständen „ich lebe“. Bleibt das aus — weil die Software hängt, weil er neu startet, weil er kaputt ist —, fällt der Sicherheitscontroller auf die Stellung der Wippschalter zurück. Was der Schalter sagt, gilt dann wieder, als hätte es die Platine nie gegeben.

Dazu ein Wachhund: eine Schaltung, die den Sicherheitscontroller selbst neu startet, wenn er einmal hängen sollte. Und ein definierter Zustand nach dem Wiederanlauf.

Was nach einem Ausfall nicht passieren darf

Die App kann einen Verbraucher zeitweilig sperren oder aus der Ferne einschalten. Beides ist nur so lange gültig, wie das Lebenszeichen steht. Fällt es aus, sind alle Befehle der App weg. Eine alte Sperre darf nach einem Ausfall nicht dauerhaft bestehen bleiben und einen Verbraucher blockieren, den jemand am Schalter eingeschaltet hat.

Und ein pauschaler Grundzustand „alles an“ ist keine Lösung. Nach einem Neustart gelten die Schalter — nicht mehr und nicht weniger.

Die lokale Bedienung ist keine Komfortfunktion der App, sondern eine eigene Bedienebene. Die App erweitert das Tableau, sie ersetzt es nicht.

Das war der Tag, an dem die Platine ihre Form gefunden hat. Nicht ein Rechner, der alles kann, sondern zwei: einer, der viel kann und ausfallen darf, und einer, der wenig kann und nicht ausfällt.

KAPITEL 4

Was passiert, wenn

18. September 2026, morgens

Zwischen dem siebten und dem achtzehnten September war ich mehrmals am Boot statt am Bildschirm. Was dabei entstand, war das Konzept, nach dem die Platine jetzt gebaut wird — in drei Fassungen an einem Morgen, die dritte vor acht Uhr. Zwischen den Fassungen lag jedes Mal dieselbe Frage: Was passiert, wenn? Wenn aus irgendeinem Grund die Platine ausfällt — eine durchgebrannte Sicherung oder andere Dinge, die ich heute nicht kenne —, dann muss ich auf See weiter navigieren können. Und schlimmstenfalls muss ich einen Notruf absetzen können. Alles andere ist Komfort. Komfort darf ausfallen.

Drei Wege, einer gewählt

Wie man die vorhandenen Wippschalter mit einer Platine verbindet, dafür gab es drei Wege, und ich habe alle drei gegeneinander gehalten.

- Beim ersten bleibt der Schalter im Lastpfad, und ein Kontakt der Platine liegt parallel dazu. Einfach, mit echtem Rückfall auf den Schalter und Fern-Einschalten aus der App. Aber die App kann einen eingeschalteten Schalter nie sperren — sie kommt an ihm nicht vorbei.
- Beim zweiten bleibt der Schalter im Lastpfad, und je Kanal kommt ein zweiter Kontakt in Reihe, der im Ruhezustand geschlossen ist und den die App öffnen kann. Rückfall und Sperre zugleich — aber deutlich mehr Relais, mehr Fläche, mehr Wärme, mehr Stellen, die kaputtgehen können.
- Beim dritten sind die Schalter nur noch Eingänge, und der Sicherheitscontroller führt die Ausgänge. Lokale Bedienung, Fern-Einschalten, Sperre und Rückfall bei einem Softwareausfall — bei vertretbarem Aufwand. Der Haken: Fällt die ganze Platine elektrisch aus, schalten auch die Ausgänge nicht mehr.

Dieser Haken hat die Entscheidung bestimmt. Für die normalen Verbraucher — Kühlschrank, Toilette, Druckwasserpumpe, Beleuchtung — ist der dritte Weg richtig. Für alles, was ich auf See brauche, darf er nicht der einzige Strompfad sein.

Verbindlich ist ein Hybrid: der dritte Weg mit dem Sicherheitscontroller für die normalen Verbraucher, und vollständig unabhängige Hand-Strompfade für Navigation, Autopilot und Funkgerät.

Die Sicherheitsgruppe

Navigationsinstrumente, der Autopilot und das Funkgerät bekommen jeweils einen eigenen, von der Platine unabhängigen und separat abgesicherten Weg von der Bordverteilung: eigene Sicherung, eigener Handschalter. Die Platine darf diese Kreise nur hochohmig erfassen — Schalterstellung, Ausgangsspannung und, wenn es sich anbietet, den Strom. Sie darf sie nie sperren und nie ausschalten. Ein Totalausfall der Platine darf keines der drei abschalten.

Das Funkgerät kam erst mit der dritten Fassung dazu. In der zweiten stand es noch als normaler Kanal drin, und ich wurde gefragt, ob das so gemeint sei. Nein — für das Funkgerät gilt dasselbe wie für die Navigation. Wenn ich einen Notruf absetzen muss, dann nicht über eine Platine, die gerade das Problem ist. Die Bilgepumpe war nie ein

Kandidat für die Platine. Sie hat ihren eigenen Sicherheitsstromkreis mit Schwimmerschalter, und ihre Automatik darf durch PELARON nicht unwirksam werden. Das „Pumpen“ am Tableau ist ausschließlich die Druckwasserpumpe.

Und die Standheizung: Dass sie nicht hart stromlos geschaltet werden darf, war durch den Nachlauf zum Abkühlen von vornherein klar. Sie bleibt dauerhaft und separat abgesichert an der Batteriebank. PELARON darf sie nur starten und stoppen, und nach einem Stopp den vollständigen Nachlauf abwarten.

Gemessen, nicht geschätzt

Bevor man Relais, Leiterbahnen und Sicherungen auslegt, muss man wissen, was die Verbraucher wirklich ziehen. Ich habe es am Boot gemessen, jeweils unmittelbar nach dem Einschalten, über die vorhandene Messung an der Batteriebank:

- Toilette: 13,2 Ampere unmittelbar nach dem Einschalten — der Hochstromkanal der Platine, mit deutlicher Reserve auszulegen.
- Autopilot: 7 Ampere bei Ruderbewegung — eigener Direktpfad, die Platine überwacht nur.
- Funkgerät: 1,2 Ampere, aber nur im Empfang. Einen Sendeversuch habe ich bewusst nicht als Seenotverkehr ausgelöst; für den Sendestrom gilt das Typenschild plus Reserve.
- Kühlschrank: 2,7 Ampere, dazu die Anlaufspitze des Kompressors, die die Messung nicht zeigt.
- Druckwasserpumpe: 2,8 Ampere — eine Pumpe ist eine induktive Last, Anlaufstrom und vorhandene Sicherung sind noch zu prüfen.
- Beleuchtung: unter zwei Ampere je Kreis, normale Kanäle.

Diese Werte sind Ausgangspunkte, keine Maximalwerte. Die Messung an der Bank mittelt und kann kurze Spitzen übersehen. Deshalb wird nichts allein nach diesen Zahlen dimensioniert.

Was ich mir damit verkaufe — und was nicht

Weniger auf der Platine heißt weniger Produkt. Ein Autopilot, den man aus der App ausschalten kann, ließe sich verkaufen. Für mich entscheidet nur der eine Gedanke: Was passiert, wenn. Ein smartes System darf den sicheren Grundbetrieb des Bootes nicht verschlechtern — das ist keine Einschränkung des Produkts, das ist das Produkt.

Nicht jede mögliche Fernsteuerung ist ein Fortschritt. Fortschritt ist, wenn das Boot auch nach einem Fehler sicher bedienbar bleibt.

KAPITEL 5

Was „ein“ wirklich heißt

18. September 2026

Eine Kontrollleuchte am Tableau zeigt heute die Stellung des Schalters. Sobald die Platine dazwischen sitzt, ist das nicht mehr dasselbe wie der Zustand des Verbrauchers. Die App kann einen Verbraucher sperren, während der Wippschalter auf Ein steht — dann ist der Ausgang elektrisch aus. Und die App kann einen Verbraucher aus der Ferne einschalten, während der Schalter auf Aus steht — dann ist der Ausgang ein.

Was soll die Lampe dann zeigen? Und was die App?

Festlegung: Die am Ausgang gemessene Spannung ist die verbindliche Rückmeldung für App und Kontrollleuchte. Ausgang elektrisch ein oder aus — nicht die Schalterstellung, nicht der abgeschickte Befehl.

Damit ergibt sich eine Tabelle, die jede Situation abdeckt. Ich habe sie mir aufgeschrieben, weil sie die Firmware später Zeile für Zeile erfüllen muss:

- Lokale Bedienung: Schalter ein, keine Sperre der App — Ausgang ein, Lampe ein.
- Sperre aus der App: Schalter ein, App sperrt — Ausgang aus, Lampe aus.
- Fern-Einschalten: Schalter aus, App schaltet ein — Ausgang ein, Lampe ein.
- Hauptrechner ausgefallen: Schalter ein, die App wird ignoriert — Ausgang ein, Lampe ein, geführt vom Sicherheitscontroller.
- Hauptrechner ausgefallen: Schalter aus — Ausgang aus. Der Schalter bestimmt.
- Platine vollständig ausgefallen: die normalen Kanäle können ausfallen; Navigation, Autopilot und Funk bleiben über ihre eigenen Schalter bedienbar.

Die Grenze der Aussage

Spannung am Ausgang heißt: Der Stromkreis ist elektrisch freigegeben. Sie beweist nicht, dass eine Lampe tatsächlich leuchtet oder die Druckwasserpumpe tatsächlich fördert. Dafür wäre eine Strommessung nötig, oder ein Drucksensor, oder eine Rückmeldung des Geräts selbst.

Deshalb misst die Platine an den Kanälen, an denen es sich lohnt, auch den Strom. Und die App unterscheidet vier Stufen, statt einfach „an“ zu sagen:

Die App darf nie so tun, als sei ein Befehl sicher ausgeführt, wenn nur ein Funkbefehl gesendet wurde. Sie muss unterscheiden zwischen: Befehl gesendet, Platine hat bestätigt, Ausgang ist wirklich aktiv, Strom fließt.

Über LTE kommt eine Bestätigung nach Sekunden, nicht sofort. In dieser Zeit darf die App nicht „ein“ zeigen, sondern „wartet“. Bleibt die Bestätigung länger als eine halbe Minute aus, ist es keine Verzögerung mehr, sondern ein Ausfall — und das steht dann so da.

Und wenn der Ausgang unter Spannung steht, aber kein Strom fließt, obwohl etwas angeschlossen sein müsste? Dann ist entweder die Sicherung des Verbrauchers durch oder das Gerät kaputt. Auch das ist eine Auskunft, und eine wichtigere als „ein“.

KAPITEL 6

Die App vor der Platine

18. September 2026, mittags

Die Platine wird im Winter gelötet. Die App, die sie bedient, wollte ich nicht bis dahin liegen lassen — und ich wollte sie nicht in Stücken bauen. Nicht erst die Schaltkette, dann die Heizung, dann die Regeln, jedes Mal mit einer eigenen Prüfung am iPad. Alles zusammen, in einer Lieferung, und dann eine Prüfung. Dafür brauchte die App eine Platine, die es noch nicht gibt. Die Lösung ist eine gedachte Platine im Kern der App: Sie kennt Kanäle mit Wippschaltern, nimmt Befehle über dasselbe Nachrichtenformat entgegen wie später die echte, leitet den Ausgang nach der Tabelle aus dem vorigen Kapitel ab, misst Spannung und Strom „zurück“ und lässt sich das Lebenszeichen abstellen — dann fallen alle Befehle weg, genau wie es das Konzept verlangt. Ihre Heizung braucht ein paar Minuten bis „heizt“ und noch einmal so lange, bis sie nach dem Stopp aus ist, wie eine echte.

Was diese Vorführung meldet, geht nicht ins Logbuch. Ein Logbuch wird vorgezeigt, nicht vorgespielt.

Das Format, das die Firmware sprechen wird

Damit die Firmware im Winter dasselbe spricht wie die App heute, ist das Nachrichtenformat jetzt festgelegt: ein einfaches Textformat, eine Meldung je Zeile, mit deutschen Feldnamen. Die Platine meldet jede Sekunde ihren ganzen Stand — Lebenszeichen, jeder Kanal mit Schalterstellung, Spannung, Strom und dem gerade wirkenden Befehl, die Messeingänge der Sicherheitsgruppe, die Heizung, die Platine selbst, die Sensoren. Sie bestätigt jeden Befehl oder lehnt ihn mit Grund ab. Und sie meldet, wenn etwas passiert ist: Neustart, Rückfall auf die Schalter, Landstrom weg, Feuchte in der Bilge.

Die App schickt zwei Arten von Nachrichten: einen Befehl für einen Ausgang — Fern-Einschalten, Sperre oder „keiner“ — und einen für die Heizung: Start, Stopp, Ziel, Laufzeit.

Was die Platine nie bekommt, ist ein Befehl für einen Messeingang. Die App bildet ihn nicht, und das Format hat dafür kein Feld. Ein Befehl trägt eine Kanalnummer, keinen Namen — und Navigation, Autopilot, Funk und Bilge haben keine Kanalnummer.

Was im Logbuch steht — und was nicht

Der erste Bau schrieb jede Schalthandlung ins Logbuch: den Kühlschrank gesperrt, das Cockpitlicht an. Ich habe das gesehen und gefragt, warum die Schaltzustände im Logbuch stehen sollen — das Logbuch ist das Buch der Fahrt, nicht das Buch der Schalter.

Jetzt gibt es ein eigenes Schaltprotokoll in der App: eine Zeile je Ereignis, mit Filter und Versand, das nach drei Monaten von selbst vergisst. Ins Logbuch kommen nur drei Vorkommnisse, die die Fahrt betreffen: Feuchte in der Bilge, der Rückfall der Platine auf die Schalter, und ein Fehler der Heizung.

Regeln, die wirklich sperren

Drei Regeln, mehr nicht. Bei Unterspannung sperrt die App Verbraucher stufenweise — die Toilette zuerst, den Kühlschrank zuletzt — und gibt sie frei, wenn die Spannung wieder deutlich darüber liegt, damit nichts flattert. Die Schwellen sind einstellbar, weil nicht jeder eine Lithium-Bank hat und Blei bei anderen Spannungen einbricht. Das Ankerlicht geht an, wenn es dunkel ist und der Anker liegt. Und eine kalte Kabine ist eine Meldung, kein Befehl: Die

Heizung startet niemand außer mir.

Eine Regel handelt nur an Verbrauchern, die auf „Auto“ stehen. „Manuell“ heißt: Der Schalter bestimmt, die Regel schaut zu.

Am Mittag war der Bereich in der App gebaut und am iPad gegen die gedachte Platine geprüft: Schalter kippen, Sperre setzen, Lebenszeichen abstellen und zusehen, wie die Wippschalter wieder gelten. Die echte Platine bekommt im Winter eine App, die schon weiß, was sie von ihr erwartet.

KAPITEL 7

Was PELARON Control24 Pro nicht ist

Stand 18. September 2026

Diese Dokumentation ist zugleich mein Arbeitsgedächtnis und eine Erklärung für die, die das Gerät einmal kaufen sollen. Deshalb steht hier nicht nur, was entschieden wurde, sondern warum — und deshalb stehen hier auch die Grenzen. Eine Funktion ist nicht automatisch besser, nur weil sie per App schaltbar ist. Bei Navigation, Autopilot und Funk ist bewusst das Gegenteil richtig: Dort ist die Unabhängigkeit von der Platine der eigentliche Nutzen.

Die vorhandenen Wippschalter bleiben die vertraute lokale Bedienung. PELARON ergänzt sie um Zustandsanzeige, Automatik, Fernzugriff und Diagnose. Sicherheitsrelevante Grundfunktionen behalten einen eigenen Strompfad.

Was nicht versprochen wird

Es gibt keinen Liefertermin und keinen Preis. Es gibt keine endgültige Zahl der Kanäle, keine Zertifizierung, keine maritime Zulassung, keine garantierte Verträglichkeit mit jeder Heizung und jedem Autopiloten, keine Anbindung an Apple Home, keine Funkreichweite und keine Serienfertigung. Das lässt sich ergänzen, wenn es belastbar ist. Bis dahin steht es nicht da.

Und es gibt keinen Fern-Aus für Funk, Navigation und Autopilot. Keine hart geschaltete Heizungsversorgung. Keine Bilgenautomatik, die von der Platine abhängt. Gerade diese Grenzen zeigen, dass die Hardware aus der Bordpraxis kommt.

Wo das Projekt steht

Der Schaltplan ist eine dokumentierte Entwicklungsgrundlage, kein freigegebenes Gerät. Er hat keine elektrische, thermische, maritime oder fertigungstechnische Freigabe. Vor dem Bau gehört er in die Hände einer fachkundigen Person: Schutzkonzept, Belastbarkeit der Leiterbahnen, Relais, Sicherungen, Störfestigkeit, Rückspeisung, Abschaltspitzen induktiver Lasten, Einbaubedingungen an Bord.

Was als Nächstes kommt, in dieser Reihenfolge:

- Im Schaltplan mit dem Eingangsblatt beginnen und die drei getrennten Sicherheitsstrompfade einzeichnen — Navigation, Autopilot, Funk — mit ihren Messeingängen.
- Den Sicherheitscontroller vollständig beschalten: Lebenszeichen, Wachhund, Wiederanlauf, Rückfall.
- Erst danach die normalen Kanäle und die Logik dahinter fertigstellen.
- Bauteile festlegen — Werte, Spannungsfestigkeit, Strom, Wärme, Datenblatt je Bauteil.
- Laborprototyp am Tisch, mit Netzteil und Strombegrenzung, dann mit kleinen Lasten, dann mit echten.
- Einbau und Erprobung auf Bluebaerry, wenn das Boot wieder im Wasser ist.

Das ist ein Winterprojekt. Lötten, Firmware und der Rest der App entstehen in der Zeit, in der das Boot an Land liegt. Die Frist am anderen Ende ist der Kran im Frühjahr: Der Einbau braucht das Boot, und was bis dahin nicht fertig ist, rutscht eine Saison.

Was noch offen ist

Ein paar Dinge sind entschieden, aber noch nicht nachgewiesen, und ich schreibe sie hier hin, damit niemand sie für erledigt hält:

- Der Rückfall auf die Schalter ist als Schaltung beschlossen, aber noch nicht gebaut und nicht getestet.
- Die Victron-Geräte sollen über einen eigenen kleinen Funkbaustein angebunden werden, getrennt vom WLAN des Hauptrechners; ob sich die beiden Funkteile vertragen, ist zu prüfen.
- Das LTE-Modem zieht beim Senden kurze, hohe Ströme — die Versorgung muss das abfangen, sonst bricht die Spannung ein.
- Der Überspannungsschutz am Eingang ist vorhanden, aber sein Typ und seine Ansprechspannung sind noch nicht festgelegt.
- Der Sendestrom des Funkgeräts ist nicht gemessen; Sicherung, Leitung und Spannungsfall auf dem Funkpfad werden nach dem Typenschild ausgelegt.
- Der Abnahmetest, bei dem Platine, Hauptrechner und Sicherheitscontroller einzeln ausfallen und Navigation, Autopilot und Funk unbeeinflusst bleiben müssen, steht aus.

Drei Wörter

Damit die Begriffe auf pelaron.de zusammenpassen: Bordnetz meint in PELARON die Daten — NMEA 2000, GPS, Victron, Orca Core und die Adapter dazu. Bordsteuerung meint das Bedienen und Überwachen der Verbraucher. Und PELARON Control24 Pro ist die Hardware, auf der die Bordsteuerung läuft — die Platine, ihre Einstellungen und ihre Diagnose.

KAPITEL 8

Drei Blätter an einem Tag

19. September 2026

Seit dem neunzehnten September gilt am Schaltplan eine feste Reihenfolge: ein Blatt nach dem anderen, jedes erst elektrisch geprüft und abgeschlossen, bevor das nächste drankommt. Am Abend dieses Tages waren drei Blätter fertig — der Eingangsschutz, die Versorgung mit dem Backup und das Blatt mit den beiden Rechnern. Ich empfand den Tag als sehr erfolgreich. Viele Dinge sind jetzt klar definiert, und sie stehen nicht mehr nur in der Theorie, sondern im Schaltplan.

Ein eigener Strom für den Sicherheitscontroller

In Kapitel 3 steht, dass U_SAFE der Teil ist, der nicht ausfallen darf. Im Schaltplan hing er bis dahin aber an derselben 3,3-Volt-Versorgung wie der Hauptrechner, und diese Versorgung kam aus dem Zweig, der auch das Modem speist. Wäre dort etwas ausgefallen, wäre U_SAFE mitgegangen.

Jetzt bekommt U_SAFE eine eigene kleine Versorgung direkt aus der Bordspannung. Dazu kommt ein eigener Wachhund-Baustein, der ihn beim Einschalten erst loslässt, wenn die Spannung steht, und ihn neu startet, wenn er hängt. Die Leitungen zwischen den beiden Rechnern laufen über Widerstände, damit ein abgeschalteter Rechner den anderen nicht mitzieht.

Der kleine Rechner hängt jetzt an nichts mehr, was der große braucht: nicht an seiner Versorgung, nicht an WLAN, nicht an LTE.

Gleichzeitig ist U_SAFE schlanker geworden. Er liest die Wippschalter, führt die Relais, prüft das Lebenszeichen und misst die Bordspannung. Sensoren, Heizung, das Ereignisprotokoll und das Backup sind zum Hauptrechner gewandert. Auch das folgt aus Kapitel 3: Je weniger der kleine Rechner kann, desto weniger kann darin schiefgehen.

Wenn die Bordspannung ausfällt

Die kleine Backup-Versorgung hat an diesem Tag ihre Logik bekommen. Fällt die Bordspannung unter etwa neun Volt, schaltet ein Spannungswächter das Backup ein. Hauptrechner und Modem senden dann einen Alarm und schreiben das Ereignis ins Protokoll; danach schaltet der Hauptrechner das Backup selbst wieder ab. Relais werden aus dem Backup-Akku nie gehalten — ohne Bordspannung gibt es nichts zu schalten.

Dazu kommen drei Messwerte, die bisher fehlten: die Bordspannung, die Spannung des Backup-Akkus und die Temperatur auf der Platine.

Die Lenzpumpe – eine Korrektur

In Kapitel 4 steht, die Bilgepumpe habe einen eigenen Sicherheitsstromkreis mit Schwimmerschalter. Das stimmt so nicht: An Bord gibt es keinen Schwimmerschalter. Die Lenzpumpe soll über einen Feuchtefühler automatisch laufen.

Diese Automatik übernimmt jetzt U_SAFE über einen eigenen Kanal — ohne App und ohne Hauptrechner. Die App kann die Automatik jederzeit ausschalten. Der Handschalter der Pumpe bleibt in seinem eigenen Strompfad. Ob zusätzlich ein Schwimmerschalter als ganz unabhängige Automatik dazukommt, ist noch offen.

Alles mit Beinchen

Den Prototyp will ich im Winter hier zu Hause selbst zusammenlöten; darin habe ich Erfahrung. Das hatte an diesem Tag Folgen für die Bauteile: Bausteine, deren Anschlüsse nur als Flächen unter dem Gehäuse liegen, kommen nicht in Frage.

Drei Bauteile auf dem Versorgungsblatt habe ich deshalb getauscht. Der Umschalter zwischen normaler Versorgung und Backup besteht jetzt aus zwei sogenannten idealen Dioden, der Lader für den Backup-Akku ist ein Baustein mit Beinchen, und der Temperaturfühler auf der Platine wird durchgesteckt. Das Modem für LTE und der Funkbaustein für die Victron-Geräte kommen als fertige kleine Trägerplatinen.

Den Prototyp will ich im Winter hier zu Hause selbst zusammenlöten. Deshalb bekommt die Platine nur Bauteile, die man von Hand löten kann.

Das Pflichtenheft wächst mit

Vieles, was an diesem Tag entschieden wurde, betrifft auch die Firmware: welcher Anschluss was bedeutet, wann das Backup abschaltet, wie U_SAFE nach einem Neustart die Relais zurückholt. Damit das nicht auseinanderläuft, wird das Firmware-Pflichtenheft ab jetzt bei jeder solchen Entscheidung sofort mitgeführt — als eine einzige Datei, die ersetzt wird, damit sich keine alten Fassungen ansammeln.

Und noch eine Regel ist dazugekommen: Nach jedem Umbau eines Blattes wird geprüft, ob die Blätter davor noch stimmen.

Eine Zahl dazu: Auf dem Blatt mit den beiden Rechnern meldete die Prüfung von KiCad zu Beginn einundzwanzig Fehler, am Abend keinen mehr.

Was aus der Liste in Kapitel 7 erledigt ist

- Der Überspannungsschutz am Eingang hat seinen Typ bekommen: SMCJ16A.
- Der Rückfall auf die Schalter ist auf dem Blatt mit den beiden Rechnern vollständig gezeichnet. Der Nachweis bis zum Relais folgt mit den Blättern für die Ausgänge und die Schalter.

Was als Nächstes kommt

Als Nächstes kommt Blatt 04, der Empfänger für die Victron-Geräte über Bluetooth. Danach die NMEA-2000-Schnittstelle und die vierundzwanzig Ausgänge.

KAPITEL 9

Von zehn Blättern zu einer Platine

20. September 2026

Am Morgen fehlten noch sieben Blätter. Am Abend lag eine Leiterplatte von 320 mal 250 Millimetern auf dem Bildschirm, mit 588 Bauteilen darauf. Dazwischen lag ein Tag, an dem einfach alles reibungslos lief und gut von der Hand ging.

Das ist selten genug, um es aufzuschreiben. Die Reihenfolge vom Vortag hat sich bewährt: ein Blatt nach dem anderen, jedes geprüft, bevor das nächste drankommt. Wer so arbeitet, muss nichts zurücknehmen.

Was auf den sieben Blättern entschieden wurde

Der Empfänger für die Victron-Geräte ist jetzt ein fertiges kleines Modul mit Randkontakten, kein einzelner Funkbaustein mehr. Das folgt aus der Entscheidung, den Prototyp von Hand zu löten.

Die NMEA-2000-Schnittstelle bekam ihre galvanische Trennung. Bisher hing der Bustreiber an derselben Masse wie der Rest der Platine, und die Buserkennung verband beide Seiten über einen Spannungsteiler. Jetzt sitzt ein isolierter Treiber dazwischen, die Busseite hat ihre eigene kleine Versorgung aus dem Bus, und die Erkennung läuft über einen Optokoppler. Ein Boot mit vielen Geräten an einem Bus hat sonst Masseschleifen, und die sucht man hinterher lange.

Bei den vierundzwanzig Ausgängen ging es um Ströme. Drei Kanäle messen den Strom mit einem eigenen Messbaustein über einen Zwei-Milliohm-Widerstand, das ergibt eine Auflösung von rund einem Milliampere. Die Relais sind festgelegt: vierzig Ampere für die drei Hochstromkanäle, sechzehn für die übrigen. Und die Sicherungen sitzen auf der Platine, in derselben Bauform wie heute am Tableau. Dieselben Sicherungen, dieselben Handgriffe.

Die Heizung hat an diesem Tag ihre Leitungen verloren. Statt vier einzelner Drähte für Start, Stopp, Läufe und Fehler spricht der Hauptrechner sie über Bluetooth an. Das Protokoll der Heizung ist offen nachgebaut, und über Bluetooth bekomme ich Zustände, Temperaturen und Fehlercodes statt vier magerer Signale. Das Blatt für die Heizung ist seitdem ein reines Hinweisblatt ohne ein einziges Bauteil.

Am Abend meldete die Prüfung über alle elf Blätter null Meldungen. Keine Fehler, keine Warnungen.

Doch eine ganz schön große Platine

Danach kam der Schritt, auf den ich neugierig war. Aus dem Schaltplan wird eine Leiterplatte: 588 Footprints, verteilt auf eine Fläche von 320 mal 250 Millimetern, vier Lagen, siebzig Mikrometer Kupfer außen.

Mein erster Gedanke beim Draufschauen: doch eine ganz schön große Platine.

Die Größe kommt nicht von der Elektronik. Sie kommt von den Klemmen, den Relais und den vierundzwanzig Sicherungshaltern. Allein die Klemmenlänge summiert sich auf 757 Millimeter, das passt nur auf drei Kanten einer Platte dieser Größe. Die Bauteilfläche aller 588 Teile liegt bei rund 38 800 Quadratmillimetern, und mit dem üblichen Faktor für Abstände, Leitungen und Flächen landet man genau dort.

624 Verstöße, und keiner davon überraschte mich

Am späten Abend standen die vier Kupferflächen und die Regelbereiche. Damit war zum ersten Mal etwas da, das sich prüfen ließ. Der erste Lauf des Regelcheckers meldete 624 Verstöße und dazu 499 noch nicht verbundene Anschlüsse.

Verwundert hat mich das nicht. Beim Schaltplanentwurf war es genauso: Am Anfang steht eine lange Liste, und die meisten Punkte darauf sind keine Fehler, sondern Sortierarbeit. 325 waren reiner Bestückungsdruck, überlappende Bezeichner und Text auf Kupfer. Die räumt man ganz zum Schluss auf, sonst macht man es zweimal. Blieben 299 in Kupfer und Bohrungen, und die gehören vor die erste Leiterbahn.

Der erste Befund war ein handfester. Die Sperrflächen, die den Bereich um die Antennen von Kupfer frei halten sollen, lagen an der falschen Stelle: Die des Hauptrechners bei einer Koordinate, das Modul selbst zweihundertfünfzig Millimeter weiter. Solche Flächen stecken im Bauteil und tragen absolute Koordinaten; beim Verschieben des Bauteils wandern sie nicht mit. Das hatte zwei Folgen. Vierundzwanzig Meldungen standen an Bauteilen, die damit nichts zu tun hatten. Und die Antennenbereiche waren in Wahrheit ungeschützt.

Lieber jetzt ausbügeln als später. Ein Fehler in der Datei kostet Minuten. Derselbe Fehler auf der gelöteten Platine kostet eine Bestellung und einen Monat.

Der Hersteller entscheidet über die Regeln

Zwei weitere Befunde hingen nicht an der Platine, sondern am Fertiger: zwölf Bohrungen mit zwei Zehntelmillimetern im Wärmepad des Hauptrechners und ein Lochabstand von 0,194 Millimetern an der USB-Buchse. Ob das teuer wird oder gar nicht geht, sagt kein Datenblatt, sondern die Firma, die die Platine macht.

Ich habe Multi-CB genommen. Ehrlich gesagt war das ein Google-Treffer, der erste. Deutscher Anbieter, KiCad-Daten werden direkt angenommen, eine Prüfung der Fertigungsdaten ist im Preis enthalten.

Deren Tabelle war dann die Antwort auf mehrere offene Fragen. Bei siebzig Mikrometer Kupfer gelten mindestens 0,15 Millimeter für Leiterbahnbreite, Abstand und Restring. Bohrungen ab zwei Zehnteln gehören zum Standard. Unsere Durchkontaktierungen liegen darüber, und der engste Abstand zweier Anschlüsse auf der ganzen Platine sind 0,15 Millimeter bei den drei Strommessern. Das passt auf den Hundertstelmillimeter.

Eine Entwurfsregel ist keine Naturkonstante. Sie ist die Zusage einer Fabrik. Wer sie setzt, bevor er den Hersteller kennt, misst gegen eine Zahl, die er sich ausgedacht hat.

Die Trennstrecke war an anderer Stelle verletzt als gemeldet

Für die isolierte NMEA-Seite gilt bei uns ein Abstand von vier Millimetern zum Rest der Platine. Der Regelchecker meldete dazu lauter Verstöße innerhalb der Busseite selbst, zwischen den beiden Anschlüssen ein und desselben Widerstands. Die Regel war richtig geschrieben. Falsch war die Zuordnung der Netze: Die Fünf-Volt-Schiene des Busses hing in der Klasse für die normale Versorgung, und ein Netz ohne Namen hatte gar keine Klasse. Der Checker hat also genau das geprüft, was dastand.

Die echten Verletzungen kamen erst beim Nachmessen heraus. Die Busklemme lag neuneinhalb Millimeter außerhalb der Sperrfläche, das Kupfer der Masse lief also bis an ihre Anschlüsse heran. Ein Abblockkondensator war über die Trennlinie gerutscht und stand zwei Millimeter von der Busseite entfernt. Und der Optokoppler stand verkehrt herum, mit der Busseite in den Platinenbereich hinein.

Beim Aufräumen fiel der nächste Punkt an. Acht Kondensatoren, die direkt am Versorgungsanschluss ihres Bausteins sitzen müssen, standen zwischen 112 und 206 Millimetern daneben. Drei davon gehören an die Strommesser, und in meinem eigenen Aufgabenheft steht seit Tagen, dass genau diese drei dicht an den Baustein gehören. Jetzt sitzen sieben von acht zwischen zwei und dreieinhalb Millimetern von ihrem Anschluss.

Am Ende steht in Kupfer eine Null

Der letzte Lauf des Abends: keine Abstandsverstöße mehr, keine überlappenden Bauteilflächen, kein Kupfer zu nah am Rand, keine Bohrung außerhalb des Bereichs. Übrig sind vierundzwanzig unvollständige Wärmefallen, die sich beim Verlegen der Leiterbahnen von selbst erledigen, und der Bestückungsdruck.

Was als Nächstes kommt, ist das Verlegen der Leiterbahnen. Zuerst der Hochstrom von der Einspeisung zu den Sicherungen und Relais, dann die Versorgungen, dann Funk und Signale. Die Breiten stehen fest: neun Millimeter für die dreißig Ampere der Einspeisung, fünf für die Hochstromkanäle, drei für die übrigen.

KAPITEL 10

Fünf Löcher, vier Pins

21. September 2026, abends

Ein Bauteil, das KiCad nicht bestücken wollte

Der Abend begann mit einer Zeile, die nicht dahin gehörte. Ich wollte den Footprint des ESP32 tauschen, und die Aktualisierung aus dem Schaltplan meldete:

„Füge U6 Fertigungsattribut ‚Nicht bestücken‘ hinzu.“

Im Schaltplan stand nichts davon. Claude hat nachgemessen: das Symbol, die Netzliste mit 582 Bauteilen, die Projektdatei. Überall sauber. Die Ursache lag bei KiCad 10 selbst. Heißt ein Footprint auf der Platine anders als im Schaltplan, hält KiCad ihn für eine andere Bestückungsvariante und will ihn abschalten. Der Weg steht jetzt fest: erst im Leiterplatteneditor „Footprints ändern“, dann aktualisieren. Danach war die Zeile weg. Nicht raten, messen.

Der ESP32 bleibt, wo er ist

Der ESP32 steht ganz rechts, der Sicherheitscontroller ganz links. Die Idee war, beide zusammenzurücken. Die Messung sagt etwas anderes. Der ESP32 hat fünfunddreißig Signalnetze, und ihre Partner sind über die ganze Platine verteilt. Heute summieren sich die Wege auf 3628 mm, neben dem Sicherheitscontroller wären es 3829 mm. Also bleibt er stehen, und der FRAM kommt zu ihm. Dabei tauchten zwei Kondensatoren auf, die den ESP32 versorgen sollen und rund 200 mm entfernt saßen. Auch sie stehen jetzt am Modul. Die Zahlen haben die Entscheidung abgenommen.

Zwei Module ohne Körper

Die beiden Pololu-Wandler waren auf der Platine nur als nackte Stiftleisten gezeichnet. Die Module selbst fehlten. Der größere misst 22,9 × 22,9 mm und trägt Elkos und eine Spule. Claude hat empfohlen, beide flach zu legen, weil ein stehendes Modul an einer einzigen Stiftreihe bei Seegang wie ein Hebel wirkt. Ich habe zugestimmt: der kleine nach rechts, der große nach links.

Beim Zeichnen der neuen Footprints kam die Maßzeichnung von Pololu dazu. Der S13V30F5 hat an der Kante fünf Löcher: EN, VIN, GND, GND, VOUT. Unsere Stiftleiste hatte vier Pins. Aufgesteckt hätte der Ausgang des Backup-Zweigs im zweiten Masseloch gesessen. Der Backup hätte nie gearbeitet. Ich war erleichtert, dass es vor dem Löten aufgefallen ist.

Einmal nicht aufgepasst

Die neuen Footprints mussten in den Schaltplan. Ich habe U3 geändert, dachte ich. Tatsächlich stand der neue Eintrag bei U2, der im Schaltplan direkt darüber sitzt. Einmal nicht aufgepasst, und schon ist der Fehler in der Datei. Aufgefallen ist er an einem Zähler, der 1 statt 0 zeigte, und am Vergleich mit der Sicherung: zwei Zeilen anders, eine davon am falschen Bauteil. Auf der Leiterplatte ging es mit der Suche weiter. Wer nach U3 sucht, findet zuerst U36. Die Regel steht jetzt im Aufgabenheft: im Dialog zuerst die Referenz lesen, dann ändern.

Null im DRC

Zum Schluss lief der DRC über die ganze Platine. Seit dem letzten Lauf am 20. September haben drei Footprints gewechselt und rund vierzig Bauteile ihren Platz. In Abständen, Bohrungen und Courtyards: null Verstöße. Übrig sind Bestückungsdruck, magere Wärmefallen und die ungerouteten Verbindungen, alles erwartet vor dem Leiten. Der DRC gehört ab jetzt nach jeder Lieferung dazu. Ich bin froh über jeden Mangel, den wir vorher abstellen.

KAPITEL 11

Die Nacht, die nichts brachte

22. und 23. September 2026

Neuneinhalb Stunden für nichts

Am Abend habe ich den Autorouter angeworfen, ein freies Programm, das die Leiterbahnen selbst verlegen soll. Claude hatte die drei Hochstromwege vorher von Hand gelegt und gesperrt. Der Rest, rund tausend Verbindungen, sollte über Nacht laufen. Am Morgen war der Rechner still, und die Platine unverändert. Neuneinhalb Stunden Rechnen, kein Ergebnis, keine Datei. Das war sehr ernüchternd.

Der zweite Anlauf mit demselben Programm als eigenständiges Fenster zeigte wenigstens Zahlen. Nach dreizehn Durchgängen blieb er bei 771 offenen Verbindungen stehen und rührte sich nicht mehr. Das Ergebnis, das ich dann einlas, war unbrauchbar: Von 57 gesperrten Bahnstücken hatte er 44 überschrieben, und die Lastkanäle lagen bei 1 mm Breite statt bei 3 mm. Bei zwölf Ampere wäre die Leiterbahn die Sicherung gewesen. Ein Werkzeug, das die eigenen Regeln nicht kennt, macht sehr schnell sehr viel Falsches.

Zwei Fehler, die der Prüflauf fand

Danach haben wir es Kanal für Kanal selbst gemacht, und der Prüflauf von KiCad hat zweimal etwas gefunden, das Claudes eigene Prüfung übersehen hatte. Einmal war der Abstand zur Stromschiene zu klein, weil die Prüfung den kleineren der beiden Werte genommen hatte. Einmal lag eine Bahn zu dicht an einem Messbaustein, weil die Drehung seiner schmalen Anschlussflächen doppelt gerechnet worden war.

Ich fand das nicht tragisch. Lieber jetzt alles finden.

Beides ist berichtigt, und beide Male hat die zweite Prüfung gegriffen. Genau dafür ist sie da.

Die Relais tauschen die Plätze

Dann zeigte sich, warum die Wege so schwer zu legen waren. Die Sicherungen stehen der Reihe nach, die Relais nicht: Die elfte Sicherung sitzt rechts außen, ihr Relais links innen. Solche Kreuzwege blockieren sich in den engen Gassen. Die Relais wurden deshalb untereinander getauscht, jedes an die Stelle, die zu seiner Sicherung passt, und die drei Reihen weiter auseinandergezogen. Danach ist der Weg von der Sicherung zum Relais im Mittel 55 statt 95 mm lang, und alle 24 Wege liegen.

Gemessen hat Claude dabei auch, wie nah wir am Bestmöglichen sind. Die Summe aller Luftlinien beträgt 4290 mm, das theoretische Minimum 4286 mm. Vier Millimeter Unterschied. Dort ist nichts mehr zu holen.

Wo die Platine an ihre Grenze kommt

Der zweite Abschnitt, von den Relais hinunter zu den Lastklemmen, ging nur zu zwei Dritteln auf. Dreizehn von einundzwanzig Wegen liegen, acht finden keinen Durchgang mehr. Nicht weil die Fläche fehlt, die Bauteile belegen nur 43 Prozent, sondern weil in der unteren Hälfte keine Gassen mehr frei sind. Am unteren Rand stehen schon die Klemmen der Sicherheitsgruppe, am rechten die Sensorklemmen.

Zwei Platinen statt einer

Da kam mir der Gedanke, aus einer Platine zwei zu machen, übereinander statt nebeneinander. Ich stelle mir ohnehin lieber eine höhere Box vor, die in Breite und Tiefe weniger Platz braucht, und über viel mehr Höhe reden wir bei zwei Ebenen nicht.

Claude hat nachgezählt, was das kostet: Trennt man Leistung und Logik, laufen 45 Leitungen über die Grenze. Zieht der Sicherheitscontroller mit auf die Leistungsseite, sind es nur noch 20. Genau so soll es sein, denn dann liegt der ganze Rückfallweg vom Wippschalter über den Sicherheitscontroller bis zum Relais auf einer einzigen Platine und hängt nicht an einem Stecker.

Verbunden werden die beiden nicht starr, sondern mit einem kurzen Flachbandkabel mit verriegelten Steckern. Dann kann ich die obere Platine zum Prüfen abnehmen, ohne die Verbindung zu lösen.

Die Vorteile sind größer, als ich zuerst dachte. Löten wird einfacher, weil dickes Kupfer und feine Bausteine nicht mehr auf derselben Platte liegen. Prüfen wird einfacher, weil ich jede Platine einzeln in Betrieb nehmen kann, die eine am Labornetzteil, die andere am USB-Anschluss. Und die Ströme der Verbraucher laufen nicht mehr durch dieselbe Masse wie Funk und NMEA.

Eine dritte Platine für Funk wäre mit vierzehn Leitungen ebenfalls sauber zu trennen. Die heben wir uns auf. Erst zwei Platinen zum Laufen bringen, dann weitersehen.

KAPITEL 12

Zwei Etagen

24. September 2026

Am Abend vorher hatte ich den Gedanken gehabt, aus einer Platine zwei zu machen. Am vierundzwanzigsten wurde daraus Arbeit: zwei eigene KiCad-Projekte, eines für die Leistung, eines für die Logik, jedes mit eigenem Schaltplan und eigener Leiterplatte.

Ein Problem habe ich darin nicht gesehen. Die einzige andere Möglichkeit wäre eine größere Platine gewesen.

Außer einer Vergrößerung kam ja nichts in Frage. Also statt größer halt auf mehreren Etagen.

Was über den Stecker muss

Die Frage des Tages war, wie viele Leitungen zwischen den beiden Etagen laufen. Am Vortag waren es zwanzig, mit dem Sicherheitscontroller auf der Leistungsseite. Zwei Entscheidungen haben die Zahl weiter gedrückt.

Die Spannung des Backup-Akkus, sein Temperaturfühler und die Platinentemperatur werden jetzt auf der Leistungsplatine gemessen, mit einem eigenen kleinen Wandler, demselben Typ, der auf der Logikseite die Sensoren liest. Nebenbei kann der Sicherheitscontroller die Akkuspannung dann selbst lesen.

Und die drei Strommesser bekommen einen eigenen Bus. Bisher führte der Hauptrechner ihn, und der wandert auf die Logikplatine. Jetzt führt der Sicherheitscontroller den Bus auf der Leistungsseite, der Hauptrechner behält seinen eigenen auf der Logikseite und fragt die Ströme über die Verbindung zwischen den beiden Rechnern ab. Am Ende laufen dreizehn Leitungen über den Stecker, und kein Bus geht über die Grenze.

Die Sicherungen müssen erreichbar bleiben

Als es um die Lage der zweiten Platine ging, lag ein Punkt auf der Hand. Die Klemmen an allen vier Rändern der Leistungsplatine müssen mit dem Schraubendreher erreichbar bleiben, und die vierundzwanzig Sicherungen auch. Eine Logikplatine, die groß genug für alles gewesen wäre, hätte beide Sicherungsreihen zugedeckt. Jede defekte Sicherung hätte dann bedeutet: erst die obere Platine abschrauben.

Deshalb liegt die Logikplatine jetzt flach unterhalb der Sicherungen, 230 mal 140 Millimeter groß, über den Relais. Die Befestigungslöcher beider Platinen sind aufeinander abgestimmt, jedes Loch der Logikplatine sitzt über einem Loch der Leistungsplatine.

Ein Abend mit vermeidbaren Fehlern

Der Abend hat viel Zeit gekostet, und das meiste davon war vermeidbar. Claude hatte zwei neue Bauteiltypen direkt in ein Schaltplanblatt geschrieben statt in die Bibliothek. KiCad hat das Blatt daraufhin stillschweigend verworfen. Aufgefallen ist es nur, weil die Prüfung von 8 auf 12 Meldungen stieg und wir die Meldungen einzeln verglichen haben.

Die neue Logikplatine meldete „Parität 0“, und so wurde sie auch als in Ordnung gemeldet. Die volle Prüfung zeigte dann 34 Kurzschlüsse und 43 überlappende Bauteile. Die Bauteile waren wie in einem Regal zusammengeschoben, nicht nach ihren Verbindungen geordnet. Die Platine musste neu aufgebaut werden.

Viel Arbeit umsonst, aber naja.

Aus dem Abend sind drei Regeln geworden, die jetzt in den Arbeitsregeln stehen: Neue Bauteiltypen gehören in die Bibliothek. Nach jeder Lieferung einer Leiterplatte läuft die volle Prüfung, nicht nur der Vergleich mit dem Schaltplan. Und zu Beginn jeder Sitzung werden zuerst die Arbeitsregeln gelesen, nicht erst, wenn etwas schiefgegangen ist.

KAPITEL 13

Ein Drittel Platz

25. September 2026

Der Tag begann mit Wärme. Ein Gehäuse gibt es noch nicht; es entsteht nach dem Test der Platinen mit dem 3D-Drucker. Aber was darin warm wird, lässt sich schon rechnen. Die größte Quelle sind die Relaisspulen, zusammen rund zwölfteinhalf Watt bei 12 Volt.

Die meisten Relais liegen unter der Logikplatine. Mit 25 Millimeter hohen Abstandsbolzen wären über ihnen rund acht Millimeter Luft geblieben. Die Bolzen werden deshalb 35 Millimeter hoch, dann sind es rund achtzehn. Die kleine Backup-Zelle kommt ins Gehäuse, unten in den Zuluftstrom neben die Lastklemmen, mit dem Temperaturfühler direkt an der Zelle.

Auf der Leistungsplatine liefen acht Lastwege teilweise auf einer Innenlage mit halb so dickem Kupfer. Statt sie alle umzulegen, bekommen diese Kanäle die kleinen Verbraucher, wie die Beleuchtung. Nur der Weg zum Kühltank wird neu gelegt. Und vier Kanäle, deren Klemmen am anderen Ende der Platine saßen, bekommen einen eigenen Klemmenblock in der Ecke, die durch den Umzug der Logik frei geworden ist.

Stundenlang, und doch nicht fertig

Dann die Logikplatine. Ihre Kupferflächen standen, jetzt sollten die Leiterbahnen kommen. Wie in der Nacht zum dreiundzwanzigsten lief dafür wieder der Autorouter, diesmal aus dem Terminal, damit man den Fortschritt sieht. Er lief stundenlang und blieb bei 113 offenen Verbindungen stehen.

Ich war enttäuscht. Vom Autorouter, der trotz stundenlanger Arbeit das Leiten nicht hinbekommen hat. Und von Claude, der die Bauteile so nah aneinander gesetzt hatte, obwohl auf der Platine fast ein Drittel Platz frei war.

Warum sitzen die Bausteine so nah beieinander? Nutze den ganzen Platz.

Danach wurden die großen Gruppen als Ganzes auseinandergezogen: der ESP32 mit seinem Umfeld, der XIAO, die Sensorbausteine, das LTE-Modul mit SIM-Karte, der VoCore2 und die Wandler. Jede Gruppe blieb in sich unverändert und bekam nur einen neuen Platz. Mit dem Platz kam der Autorouter deutlich weiter. Den Rest hat Claude Netz für Netz selbst gelegt und dabei weitere Bauteile verschoben oder gedreht, wo eines einem anderen den Weg versperrte. Am Ende hatten mehr als hundert Bauteile einen anderen Platz als am Morgen.

Eine Buchse, die richtig herum saß

Beim Leiten fiel Claude die USB-C-Buchse auf. Die Anschlüsse lagen am Rand, der Körper reichte nach innen, und der Verdacht war, die Öffnung zeige zur Platinenmitte. Ich habe sie mir in der 3D-Ansicht angesehen, von oben und von der Kante. Die Öffnung zeigt nach außen, die Buchse sitzt richtig. Der Verdacht war falsch, aber nachsehen kostete zwei Minuten.

Bis die Liste leer war

Der Rest des Abends war Aufräumen. Die Masseflächen waren von den vielen Bahnen in Inseln zerschnitten und bekamen eigene Durchkontaktierungen. Kleine Reste, die nichts mehr verbanden, flogen heraus. Nach jedem

Schritt habe ich die Flächen neu gefüllt und die Prüfung laufen lassen: 52 offene Verbindungen, dann 8, 5, 3, 2.

Die letzten zwei gehörten zur Schirmbrücke des NMEA-Busses, einem Widerstand und einem Kondensator zwischen dem Schirm des Busses und der Masse der Platine. Die beiden stehen jetzt am Rand der isolierten Busseite, mit dem Masseanschluss außen und dem Schirmanschluss innen. Für genau diese eine Verbindung gilt jetzt ein Millimeter Abstand statt vier; alle anderen Leitungen des Busses behalten ihre vier Millimeter.

Um kurz vor elf meldete die Prüfung null offene Verbindungen, keine Kurzschlüsse und keine Abstandsfehler. Die Logikplatine ist vollständig geleitet.

Übrig sind unvollständige Wärmefallen, die mit der Leistungsplatine zusammen drankommen, und der Bestückungsdruck. Als Nächstes ist die Leistungsplatine dran: ihre dünnen Leitungen und Kleinsignale. Danach die Wärmefallen beider Platinen und die Fertigungsdaten.

Was bleibt

Was ich aus diesen Tagen mitnehme, ist ein einziger Satz.

Trotz mehrerer KI-Modelle ist es eine Heidenarbeit, etwas zu entwickeln.

KAPITEL 14

Fertig zum Bestellen

26. bis 29. September 2026

Nach der Logikplatine war die Leistungsplatine dran. Auf ihr sitzt alles, was Strom führt: die Einspeisung, die Sicherungen, die Relais, die Strommessung – und bis zu diesem Wochenende auch die Eingänge der Wippschalter.

Mehr Platz

Am Samstag war die Platine schlicht zu eng. Mein Satz an Claude war kurz:

Zieh die Bauteile weiter auseinander oder vergrößere die Platine.

Sie wuchs von 320×250 auf 320×280 Millimeter. Die Lastwege der Kanäle 4 bis 24 wurden neu gelegt, jeder möglichst auf einer Außenlage. Wo das nicht ging, wechselt er die Lage über fünf Durchkontaktierungen nebeneinander, damit zwölf Ampere sicher durchpassen.

Eine dritte Platine

Am Sonntag war klar, dass auch das nicht reicht. Oben auf der Leistungsplatine war es zu eng, und links belegten 54 Klemmenpins die ganze Kante. Claude hat an der Netzliste nachgezählt: Die Wippschalter-Eingänge mit ihren Einlesern und Filtern, die Vorwiderstände der Kontrollleuchten und die Klemmen sind 108 Bauteile – aber nur 29 Leitungen verbinden sie mit dem Rest. Daraus wurde das Bedienfeld, eine eigene Platine mit zwei Lagen.

Die drei Platinen haben dieselben Maße und liegen übereinander: oben die Leistungsplatine, damit Sicherungen und Lastklemmen ohne Zerlegen erreichbar bleiben, in der Mitte das Bedienfeld, unten die Logikplatine. Weil die Wippschalter jetzt über ein Kabel gelesen werden, meldet das Bedienfeld über einen eigenen Pin, dass es steckt. Ohne diesen Pin würde der Sicherheitscontroller bei abgezogenem Kabel Zufallswerte als Schalterstellung lesen.

Für das Bedienfeld hat Freerouting, das Programm zum automatischen Leiten, in zwei Minuten 232 von 234 Verbindungen gelegt, ohne einen einzigen Verstoß. Bei der Leistungsplatine brachte es nichts Brauchbares.

Anderthalb Tage auf dem falschen Fundament

Der größte Fehler dieser Tage lag bei Claude: Anderthalb Tage lang wurde auf einer Anordnung geleitet, die aus der alten Einzelplatine nach Schaltplanblättern übernommen war und nie für das Leiten gedacht war. Mit jedem Durchgang wurden die Reste schwerer, statt dass die Anordnung selbst infrage gestellt wurde. Seitdem gilt die Regel: erst die Anordnung prüfen, dann leiten.

Am Sonntagabend habe ich die Anordnung deshalb selbst vorgegeben: die Sicherungen links von oben bis unten, rechts daneben alle Relais, die Hochlastrelais unten, die rechte Hälfte frei für alles andere, weit verteilt – „alles mit Sinn und Verstand“.

Dazu kam: Die Zuleitungen zu drei Kanälen fanden nur über die Innenlagen einen Weg. Die Leistungsplatine hat deshalb sechs Lagen statt vier, und die Kanäle 13 bis 15 sind auf höchstens fünf Ampere begrenzt.

Bestellt

Am Montag wurden die Versorgung und danach die Signale neu gelegt, mit Claudes eigenem Router, und die Prüfung lief so lange, bis keine offene Verbindung mehr übrig war.

Am Dienstag kamen die letzten Prüfungen. Eine davon fand in der Bestellliste zwei Kippschalter, wo auf der Logikplatine Taster hingehören – für BOOT und RESET des ESP32. Mit einem Kippschalter wäre der Hauptrechner je nach Stellung dauernd im Reset oder im Startmodus gewesen.

Dann waren alle drei bestellt, bei Multi-CB: die Leistungsplatine mit sechs Lagen und chemisch Gold, die Logikplatine mit vier Lagen, das Bedienfeld mit zwei. Versand um den 21. Oktober.

Was bleibt

Das Fertigstellen hat länger gedauert, als es hätte dauern müssen. Mein Fazit dazu:

Das Fertigstellen der Platinen war mit einigen, naja, vielen Fehlern seitens der KI verbunden und hat dadurch sehr lange gedauert. Aber schlussendlich zählt der Erfolg.

KAPITEL 15

Teile, die es nicht gibt

29. September bis 1. Oktober 2026

Eine Platine ist erst bestellt, wenn auch ihre Teile bestellt sind. Für die drei Platinen sind das knapp 600 Bauteile.

Mouser

Mein Hauptlieferant sollte Mouser sein. Die Stückliste dort einzulesen, war zäher als gedacht: Das Werkzeug zum Hochladen nimmt nur rund 60 Zeilen pro Datei und hört nach etwa fünf Versuchen am Tag ganz auf. Der Assistent für Preis und Verfügbarkeit nimmt mehr, verwechselt aber reine Nummern: Aus zwei Teilen von Keystone wurden eine Spule von Visaton und ein Drehgeber von Adafruit.

Dreizehn Kondensatoren von Murata gab es bei Mouser nicht; sie wurden durch gleichwertige von Samsung ersetzt. Ein Kondensator mit 33 Pikofarad war abgekündigt und kommt jetzt von Yageo.

Lieferzeiten

Der Sicherheitscontroller, ein STM32G0B1CBT6, hatte bei Mouser 52 Wochen Lieferzeit. Bestückt wird jetzt sein großer Bruder, der STM32G0B1CCT6: gleiches Gehäuse, gleiche Anschlüsse, doppelt so viel Programmspeicher. LCSC hatte davon noch genau ein Stück.

Das FRAM auf der Logikplatine, der Speicher, der auch ohne Strom behält, was der Hauptrechner hineinschreibt, ist nicht mehr lieferbar. An seine Stelle tritt ein FM24V02A von Infineon mit derselben Belegung.

Zwei Lieferanten

So kam ein zweiter Lieferant dazu, LCSC in China. Claude hat jede Position zwischen beiden verglichen, gezählt hat nur, was auf Lager liegt, und nur derselbe Hersteller. 34 Positionen sind von Mouser zu LCSC gewandert, weil sie dort günstiger oder überhaupt lieferbar waren. Auch hier lief nicht alles glatt: Beim ersten Durchgang hat Claude Treffer übersehen, die LCSC als „Hot“ kennzeichnet, und drei Teile fälschlich als nicht auf Lager gemeldet.

Die Bestellung bei LCSC ging in der Nacht zum 1. Oktober hinaus, 55 Positionen. Auf die Reise geht sie erst nach den Betriebsferien dort, die bis zum 7. Oktober dauern. Bei Mouser liegen 72 Positionen im Warenkorb, einige mit Lieferterminen bis Ende Oktober; bestellt wird Ende dieser Woche.

Was bleibt

Was mich an diesen Tagen überrascht hat:

Mich hat verblüfft, wie unangenehm Bezug und Preis der einzelnen Bauteile sind. Die Zahlen lasse ich hier weg.

KAPITEL 16

Lieber jetzt als später

30. September und 1. Oktober 2026

Bis die Platinen kommen, bleiben knapp drei Wochen. Die nutze ich, um das Löten vorzubereiten.

Ein Buch je Platine

Ich wollte die Schaltpläne ausdrucken – und dazu wissen, wo welches Teil hinkommt und was ich nach dem Löten prüfen muss, so dass es auch ein Laie kann. Daraus wurden drei Platinenbücher, eines je Platine, im Querformat A3: Schaltpläne, Bestückungsplan, eine Bestückungsliste nach Lötstufen zum Abhaken und ein Prüfheft.

Gelötet wird Stufe für Stufe, und nach jeder Stufe wird gemessen, bevor die nächste kommt: was, wo, womit, welcher Wert herauskommen muss und was zu tun ist, wenn nicht. Für die Messungen kommt ein Oszilloskop dazu, wahrscheinlich ein Rigol DS1102Z-E. Die Bücher sind im Druck, farbig und mit Ringbindung, damit sie auf der Werkbank flach liegen.

Zwei Fehler

Beim Herleiten der Sollwerte für das Buch der Logikplatine fand Claude zwei Fehler in der Schaltung – in der Platine, die schon in der Fertigung war.

Der erste: Am Baustein für RS-485, über den später Modbus-Sensoren angeschlossen werden, hängen beide Busleitungen an A. Im Schaltplan steht am Anschluss B schlicht das falsche Netz, und die Platine hat daraus eine kurze Brücke zwischen den beiden Anschlüssen gemacht. Modbus würde nicht gehen, und beim Senden würden die beiden Ausgänge gegeneinander arbeiten.

Der zweite: Der Wandler, der das LTE-Modul versorgt, hat einen Freigabe-Eingang, der nur über einen Widerstand an Masse hängt. Eingeschaltet hätte ihn nie etwas, das LTE-Modul hätte nie Strom bekommen.

Weder die Regelprüfung von KiCad noch die bisherigen Prüfungen haben das gefunden. Seitdem laufen zwei zusätzliche Prüfungen über alle drei Platinen: ob Anschlüsse mit verschiedener Aufgabe an derselben Leitung liegen und ob ein Steuereingang nur an Widerständen hängt. Sonst fand sich nichts. In der Netzliste meines eigenen Schaltplans habe ich beide Fehler danach selbst gesehen.

Reparieren, dann berichtigen

Für den Prototyp reicht ein LötKolben. Der Widerstand am Freigabe-Eingang wird einfach nicht bestückt, dann schaltet der Wandler von selbst ein. Am RS-485-Baustein gibt es zwei Wege: das Bein für B hochbiegen und mit einem dünnen Draht zur richtigen Leitung führen – oder den Baustein vorerst weglassen, bis ein Modbus-Sensor kommt. Beide Wege stehen im Platinenbuch, entschieden wird beim Löten.

Danach wollte ich es richtig haben:

Bitte nicht nur die entsprechenden Schaltpläne ändern, sondern gleich auch die Platinen.

So entstand der Stand RevB der Logikplatine: das Netz an B berichtigt, der Widerstand gestrichen und eine neue Leitung für B, rund zehn Zentimeter lang, neben A bis zum Stecker. Die Regelprüfung des Schaltplans meldet null

Fehler, die Prüfung der Platine null Fehler und keine offene Verbindung. Der bestellte Stand RevA bleibt, wie er ist. Im Platinenbuch stehen beide Fassungen der zwei Blätter, die alten deutlich als „nur für den Prototyp“ gekennzeichnet.

Selbst das Anlegen des Ordners für RevB hakte: Das Kopieren blieb an KiCads Versionsverlauf hängen, dessen Dateien nur in iCloud lagen. Und das Firmware-Pflichtenheft passte an einigen Stellen nicht mehr zur bestellten Logikplatine; es ist nachgeführt.

Als Nächstes kommen die Bestellung bei Mouser und das Prüfprogramm für den ersten Strom auf den Platinen – und um den 21. Oktober das Paket von Multi-CB.

Was bleibt

Zu den zwei Fehlern auf der bestellten Platine:

Unschön, aber reparabel. Lieber jetzt noch am Prototyp als später.

KAPITEL 17

Alles bestellt

2. bis 6. Oktober 2026

Die Platinen waren in der Fertigung, die Teile von LCSC bestellt. In diesen Tagen ging der Rest hinaus – an sieben weitere Lieferanten.

Mouser

Am 3. Oktober ging die Bestellung bei Mouser hinaus, 72 Positionen. Am Tag danach fiel auf, dass eine fehlte: die kleine passive Antenne, mit der das LTE-Modul seine Position bestimmt. Sie sitzt nicht auf der Platine und stand noch als offen auf der Liste; Claude hatte beim Abgleich nur die 72 Positionen geprüft. Meine Frage dazu:

Warum hast du die Antenne nicht gleich eingefügt?

Ich habe Mouser gebeten, sie zu ergänzen. Online geht das nicht, und als dort schon gepackt wurde, haben wir es gelassen. Die Antenne kommt mit der nächsten Bestellung.

Am 6. Oktober hat Mouser zwei Positionen storniert, beide von Microchip: einen der beiden Spannungswächter der Backup-Versorgung, den MIC2779L, und den Port-Erweiterer MCP23017 der Logikplatine. Grund war eine Beschränkung des Herstellers für die Lieferanschrift. Ich habe beide noch am selben Tag direkt bei Microchip bestellt. Den zweiten Wächter, den MIC2779H, hatte ich dort schon zwei Tage vorher bestellt. Die beiden unterscheiden sich nur in einem Buchstaben und schalten genau umgekehrt – vertauschen darf man sie beim Löten nicht.

Schon beim Bestellen war klar, dass drei Positionen später kommen: die Relais der drei großen Kanäle und zwei Sorten Klemmen.

Die kleinen Lieferungen

Am 4. Oktober folgten die kleineren Bestellungen. Die Warenkörbe hat Claude in meinem Browser gefüllt, bestellt und bezahlt habe ich selbst: bei Eckstein die beiden Spannungswandler von Pololu, die Temperaturfühler und den Feuchtesensor, bei VoCore das WLAN-Modul VoCore2 und bei akkuteile.de die Backup-Zelle, eine LiFePO4-Zelle mit Lötflächen.

Am 5. Oktober kam die SIM-Karte für das LTE-Modul dazu, bei 1NCE: zehn Jahre Laufzeit und 500 Megabyte.

Werkzeug

Für das Löten und Prüfen fehlte Werkzeug: eine Heißluftstation, eine ESD-Matte, feine Pinzetten, ein Mikroskop, ein Netzteil für 30 Ampere als Ersatz für die Bordbatterie im Winter – und das Oszilloskop, ein Rigol DS1102Z-E. Claude hat alles auf einer Wunschliste bei Amazon gesammelt, gekauft habe ich am 6. Oktober, zu den Prime Deal Days. Die Stromzange nicht:

Die Stromzange borge ich mir.

Die Pinzetten eines Händlers ohne Bewertungen, mit Lieferung erst im November, habe ich storniert und durch ein ESD-Set von XOOL ersetzt.

Was bleibt

Zu den Bestellungen:

Mich hat schon verwundert, dass es keinen deutschen Vertrieb gab, der alle Bauteile zusammen liefern konnte, und dass gewisse Bauteile eine extrem lange Lieferdauer haben.

KAPITEL 18

Programme vor den Platinen

1. bis 8. Oktober 2026

Bis die Platinen kommen, kann nichts gelötet werden – programmiert aber schon. In diesen Tagen hat Claude die Programme geschrieben, die auf den drei Rechnern der Platinen laufen werden.

Erst prüfen

Zuerst die Prüfprogramme. Mit ihnen schalte ich bei der Inbetriebnahme jedes Relais einzeln, lese jeden Schalter und jeden Messeingang und spreche jeden Baustein an – über ein Kabel vom MacBook und einfache Befehle. Eines ist für den Sicherheitscontroller U_SAFE, eines für den Hauptrechner, den ESP32. Dazu kam das Programm für den kleinen XIAO, der per Bluetooth die Victron-Geräte mithört und ihre Meldungen an den ESP32 weiterreicht. Zu jedem gibt es eine Anleitung, die zu den Prüfschritten der Platinenbücher passt.

Dann die richtigen

Danach die Bordprogramme, die später dauerhaft laufen. Am 5. Oktober das für U_SAFE: Es führt die Wippschalter auf die Relais, schaltet die drei großen Kanäle bei Überlast ab, steuert die Lenzpumpe automatisch und startet den Hauptrechner neu, wenn er hängt. Mit dem ESP32 spricht es über eine eigene Leitung in einfachen Textzeilen mit Prüfsumme.

Das Bordprogramm des ESP32 entstand vom 5. bis 7. Oktober in Stufen: zuerst die Verbindung zu U_SAFE und über WLAN zur App, dann Landstrom, Kabinentemperatur und die Werte der Victron-Anlage, dann die Alarme und das Backup, zuletzt NMEA 2000.

Entscheidungen

Wie die Steuerung nach außen spricht, habe ich in diesen Tagen festgelegt. Zuerst das LTE-Modul:

Bedenke, dass das LTE nur für den Notfall da ist, im Hafen wird ja immer über das WLAN gesendet.

Das Modem bleibt deshalb aus, solange WLAN da ist, und wird nur eingeschaltet, wenn ein Alarm hinaus muss. Für Alarme gilt:

Nachricht an ein iPhone nur, wenn die App nicht verbunden ist!

Für den Prototyp geht so eine Nachricht über den Dienst Pushover aufs iPhone, zuerst über WLAN, ohne WLAN über LTE. Für eine spätere Verkaufsfassung wird das neu überlegt.

Dann der Bordbus:

Es sollen nicht nur alle Daten kommen, sondern auch gesendet werden, wie die Werte der Batteriebank; die native App wird sich dann über das WLAN anbinden, und die Daten werden fürs Logbuch gebraucht.

Die Steuerung meldet sich jetzt als Gerät am NMEA-2000-Bus an und sendet die Batteriebank, die Kabinentemperatur und die Schaltzustände, so dass der Plotter sie anzeigen kann. Schaltbefehle vom Bus nimmt sie bewusst nicht an. Und sie reicht alles vom Bus über WLAN an die App weiter – das Gateway, das heute dafür an Bord hängt, wird damit später überflüssig.

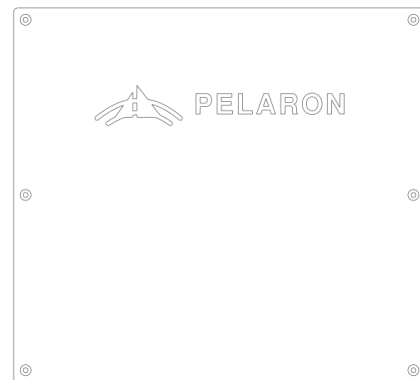
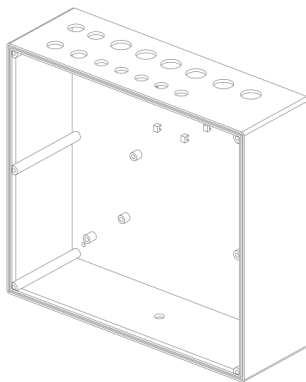
Zuletzt der Fernzugriff: nur über das WLAN im Hafen, durch einen verschlüsselten Tunnel des WLAN-Moduls auf der Logikplatine, nie über LTE. Jede dieser Entscheidungen steht im Firmware-Pflichtenheft, das in diesen Tagen von Fassung 10 auf Fassung 14 wuchs.

Geprüft, aber nur im Modell

Keines dieser Programme ist bisher auf echter Hardware gelaufen. Claude hat jedes an einem Modell der Platine geprüft, das die Bausteine nachbildet – beim ESP32 zuletzt mit 146 Prüfungen ohne Fehler und mit einem Mitschnitt vom Bus der Bluebaerry vom 10. September.

Ein Gehäuse aus dem Drucker

Am 4. Oktober kam die Frage nach dem Gehäuse. Daraus wurde ein Wandgehäuse zum 3D-Druck, 380 × 345 × 145 Millimeter, am Stück gedruckt, mit Sockeln für die drei Platinen, 15 Kabelverschraubungen oben und dem PELARON-Zeichen vertieft im Deckel. Gedruckt wird es bei einem Druckdienst; die Anfrage schicke ich selbst.



Das Gehäuse als Modell: links das Unterteil mit den Löchern für die Kabelverschraubungen oben, rechts der Deckel mit dem vertieften PELARON-Zeichen. Die Zeichnung zeigt eine frühere Fassung mit 4 Millimeter Wand, außen ist sie gleich.

Am selben Tag habe ich auch festgehalten:

Zum Verkauf sind die Platinen eh noch viel zu groß, dafür müssen die kleiner und kompakter werden.

Der Prototyp bleibt, wie er ist – für die Bluebaerry.

Was bleibt

Zu den Programmen:

Die Programme liefen eigentlich ganz glatt und waren schnell erledigt. Jetzt müssen sie sich auf den Bauteilen und an der fertigen Platine beweisen.

KAPITEL 19

Die ersten Pakete

7. bis 9. Oktober 2026

Ab dem 7. Oktober kamen die ersten Pakete – und mit ihnen die ersten Messungen.

Vorbereitet

Am 7. Oktober kam die SIM-Karte. Im Portal von 1NCE war sie schon aktiviert, freizuschalten war nichts.

Am 8. Oktober habe ich das MacBook eingerichtet, damit es beim Auspacken bereit ist: das Programm von ST, mit dem U_SAFE sein Programm bekommt, und das Werkzeug zum Aufspielen auf den ESP32. Mein MacBook hat noch einen Intel-Prozessor; das Programm von ST gibt es dafür in einem eigenen Paket. Das Werkzeug für den ESP32 ließ sich erst im zweiten Anlauf installieren: Claude hatte die Anleitung nur mit einer neueren Python-Fassung geprüft als der auf meinem Mac.

Pakete

Am 9. Oktober kam fast alles auf einmal: die meisten Artikel von Amazon, die Backup-Zelle, die ersten Spannungswächter von Microchip – und am Nachmittag, drei Tage früher als angekündigt, das Paket von Mouser.

Manoman, so viele Teile.

Den Lieferschein, 15 Seiten, habe ich Position für Position mit den Etiketten der Beutel abgehakt. Claude hat ihn danach mit der Bestellung verglichen: 68 Positionen vollständig, es fehlen nur die drei Rückstände. Die Relais der großen Kanäle kommen Anfang November, zwei Klemmen Mitte November, eine weitere ohne Termin. Ich warte darauf, statt sie anderswo zu kaufen.

Die Beutel mit Fundstellen zu beschriften, wie es im Plan stand, halte ich für nicht nötig: Auf jedem Etikett stehen die Mouser-Nummer, die Beschreibung und sogar die Position im Lieferschein. Nur die ESD-Matte von Amazon kommt einen Tag später.

Erste Messungen

Gemessen habe ich gleich: Die Backup-Zelle hat im Lieferzustand 3,268 Volt, sie ist etwa halb voll, so werden diese Zellen verschickt. An der Heißluftstation und an der Lötstation habe ich den Schutzleiter gemessen, beide in Ordnung.

Der falsche Stecker

Dann kam der nächste Fehler zutage. Mein MacBook hat nur USB-C-Buchsen – das USB-Seriell-Kabel für die Konsolen und die beiden Adapter für CAN und RS-485 haben aber USB-A-Stecker, und der Programmierer für U_SAFE kommt ganz ohne USB-Kabel. Claude hatte jedes Gerät daraufhin geprüft, ob es elektrisch zur Platine passt, aber nicht, ob sein Stecker an meinen Mac passt. Meine Frage:

Warum prüfst du das nicht vorher?

Die Geräte selbst sind richtig, es fehlte nur ein Adapter. Den habe ich bestellt, er kommt am Montag. Seitdem steht in den Arbeitsregeln, dass vor jeder Bestellung auch Stecker und Lieferumfang gegen das Gegenstück geprüft werden.

Gemessen habe ich das Kabel trotzdem, an einem Handy-Netzteil: 3,34 Volt. Es ist also wirklich eines für 3,3 Volt – mit 5 Volt hätte es das WLAN-Modul auf der Logikplatine beschädigt.

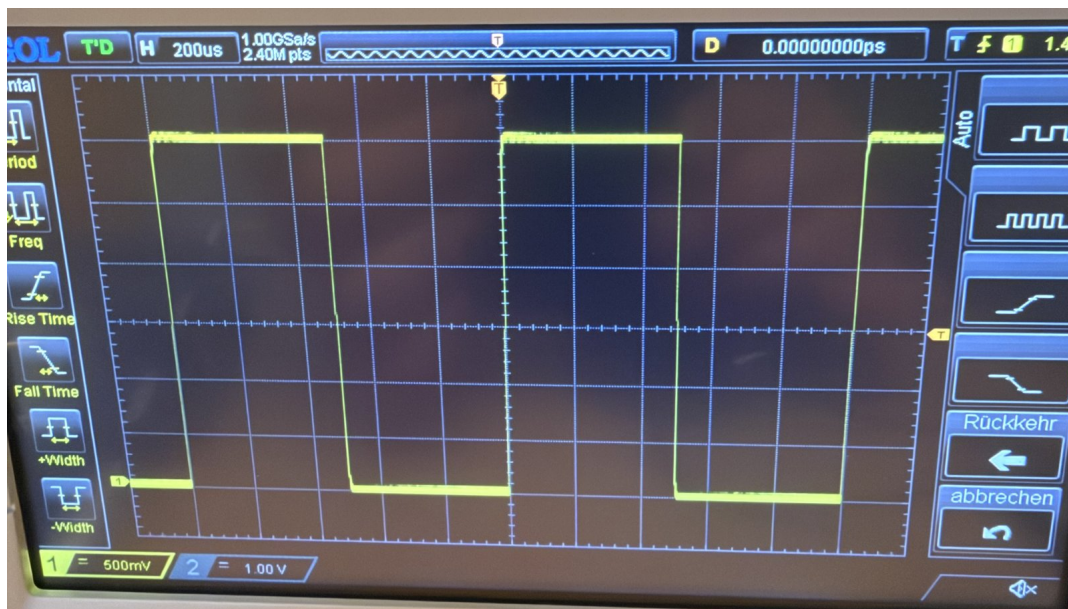
Das erste Oszilloskop

Das Rigol war auch dabei. Meine Bitte an Claude dazu:

Es ist mein erstes Oszilloskop, und ich habe davon null Ahnung.

Daraus wurde eine eigene Anleitung, zehn Seiten: was die Kästchen auf dem Bildschirm bedeuten, welche Taste was tut, warum die Masseklemme nur an bestimmte Punkte darf – und dann jede Messung aus den Platinenbüchern Schritt für Schritt, mit einer Skizze, wie das Bild aussehen soll.

Am Nachmittag habe ich die ersten Übungen gemacht, noch ohne Platine. Schon das Anschließen war neu: Wohin kommt der Tastkopf, wohin die Klemme? Dann Grundeinstellung, AUTO – und da stand das Rechteck des Abgleich-Ausgangs, 1,00 Kilohertz und 3,04 Volt. Die Messwerte für die Spannung fand ich erst über eine Taste, die in der Anleitung noch fehlte.



Mein erstes Bild auf dem Oszilloskop: das Rechteck des Abgleich-Ausgangs. Ein Kästchen nach oben sind 0,5 Volt, eines nach rechts 200 Mikrosekunden. Sechs Kästchen hoch sind 3 Volt; knapp fünf Kästchen breit ist eine Millisekunde, also 1 Kilohertz.

Zum Schluss die Übung, auf die es später ankommt: SINGLE drücken, der Haken hängt frei, das Gerät wartet – Haken an, und das Bild bleibt stehen. Genau so wird später die Spannungsspitze beim Abschalten eines Relais festgehalten.



Die Übung mit SINGLE: Links vom kleinen T hing der Haken noch frei, am T habe ich ihn angeklemmt, und das Gerät hat genau diesen Augenblick festgehalten. Rechts davon die Unruhe, weil der Haken beim Anklemmen kurz keinen sauberen Kontakt hatte.

Am späten Nachmittag noch der Programmer, mit dem U_SAFE später sein Programm bekommt: Der Mac hat ihn erkannt, und seine Firmware habe ich auf den neuesten Stand gebracht.

Was bleibt

Zum Oszilloskop:

So ein Oszilloskop ist schon ein feines Gerät, aber bis man die Funktionsweise so richtig verstanden hat und ebenso die Einstellungen, braucht man fast einen akademischen Abschluss in Elektrotechnik.

KAPITEL 20

Kleiner und kompakter

10. bis 13. Oktober 2026

Ein paar Tage ohne große Pakete. Ich habe sie genutzt, um weiter nach vorn zu denken: an das Gehäuse, an die App und an eine Fassung, die man verkaufen kann.

Das Gehäuse baut ein Bekannter

Am 10. Oktober hat sich die Frage nach dem Druckdienst erledigt:

Das Gehäuse lässt ein Bekannter in dessen Firma bauen! Das kostet mich eine kleine Aufmerksamkeit.

Für ihn hat Claude alles auf einem Druckblatt zusammengefasst, fünf Seiten mit Maßen, Ansichten und den Teilen, die dazugehören. Den Werkstoff kläre ich mit ihm; vorgesehen ist ASA, kein PLA und nichts aus Metall.

Das erste Programm auf echter Hardware

Am selben Tag lief zum ersten Mal eines der Programme auf einem echten Baustein. Der kleine XIAO, der später die Victron-Geräte über Bluetooth mithört, hat sein Programm bekommen und meldet sich am MacBook alle zehn Sekunden mit „VIC bereit 0“. Dazu habe ich Pushover eingerichtet, den Dienst, über den Alarme aufs iPhone kommen. Die erste Testnachricht kam an.

Was die App wissen muss

Am 11. Oktober meine Frage:

Hast du eigentlich alle Änderungen der App, die die Hardware betreffen, schon einmal zusammengestellt?

Daraus wurde eine Liste von neun Seiten: was die App von der Platine lesen und an sie senden muss, und wie weit jeder Punkt im Code der App schon ist. Sie ist so geschrieben, dass ich in einem eigenen Chat an der nativen App weiterarbeiten kann.

Eine Fassung zum Verkaufen

Schon am 4. Oktober hatte ich festgehalten, dass die Platinen für einen Verkauf viel zu groß sind. Am 11. Oktober ging es weiter:

Wie kann die Hardware so stark verkleinert werden, dass die maximal so groß wie A5 ist?

Ich halte für eine Verkaufsversion 24 Kanäle auch als zu viele, würde dies eher auf 12 und in einer größeren Version dann auf 24 Kanäle begrenzen.

Das Ziel für eine Serie ist damit höchstens A5: zwölf Kanäle, eine große Fassung mit 24 über eine Erweiterungsplatine. Kleiner wird es vor allem, wenn Relais, Sicherungshalter und Messwiderstände durch Halbleiterschalter ersetzt werden, die den Strom selbst messen und bei Überlast selbst abschalten.

Und eine Frage, die nach den Wochen mit den Leiterbahnen nahelag:

Die Frage wäre, ob man die Planung und Entwicklung auch wieder mit KiCad macht? Gerade die Leitungswege haben extrem viel Zeit gekostet!?!

KiCad bleibt. Gleiche Kanäle werden einmal geleitet und dann vervielfältigt, und der Autorouter Quilter bekommt einen Versuch.

Am 13. Oktober kam dazu eine Mail von ST über Chips, die Auffälligkeiten in Messwerten selbst erkennen. Interessant, aber:

Nicht am Prototyp, aber später.

Was zu einer Markteinführung sonst noch gehört, von der CE-Prüfung bis zur Zertifizierung für NMEA 2000, hat Claude zusammengestellt. Das alles kommt nach dem Prototyp: erst eine Saison mit der Bluebaerry.

Was bleibt

Wie ernst mir eine Verkaufsfassung ist:

Sehr groß, das war von Anfang an das Bestreben.

KAPITEL 21

Nicht raten

12. bis 14. Oktober 2026

Am 12. Oktober kamen die ESD-Matte und der Adapter für die USB-C-Buchsen meines MacBooks. Damit konnte ich zum ersten Mal den Logikanalysator anschließen – und habe zwei Abende gebraucht, bis er zeigte, was er zeigen sollte.

Die letzten Teile von Microchip

Am 12. und 13. Oktober kamen die beiden Teile, die Mouser storniert hatte und die ich direkt bei Microchip bestellt hatte: der Spannungswächter MIC2779L und der Port-Erweiterer MCP23017. Damit sind alle Teile von Microchip da. Am 13. Oktober habe ich die ESD-Matte gemessen: knapp ein Megaohm zur Erde, das Armband knapp zwei. Beides in Ordnung.

Zwei Abende mit dem Logikanalysator

Der Probelauf war einfach gedacht: Das USB-Seriell-Kabel sendet ein Wort, der Logikanalysator liest mit, und das Programm PulseView zeigt die Buchstaben. Erkannt wurde der Analysator am 13. Oktober sofort. Danach ging vieles schief.

Ein Befehl aus der Anleitung enthielt einen Platzhalter statt des echten Gerätenamens; ich habe ihn wörtlich übernommen, und er endete sofort. Das Kabel meldet sich am Mac unter zwei Namen, und der Befehl mit dem Stern traf beide. Claude las auf einem Bildschirmfoto ab, die Linie von Kanal D0 liege unten – sie gehörte zu D1. Und die Anweisungen kamen aus Vermutungen, bis ein einziger Befehl die Ursache zeigte: Eine Sitzung vom Vorabend hielt das Kabel noch fest.

Am 14. Oktober meine Worte dazu:

Hänge jetzt schon wieder 2 Stunden an diesem Mist, gestern Abend und heute!!!

Wer hat dir gesagt, dass du raten sollst? Keiner.

Am selben Tag lief der Probelauf durch: Über den Pulsen auf D0 stand P E L A R O N. Seitdem weiß ich auch, welche Ader was tut – Weiß sendet, Grün empfängt.

Eine neue Regel

Daraus wurde eine feste Regel in den Arbeitsregeln: nicht raten. Erst die Ursache mit einem Befehl sichtbar machen, dann genau eine Lösung. In Befehlen stehen keine Platzhalter mehr, Gerätenamen werden gemessen und ausgeschrieben, und jeder neue Befehl wird nachgebildet, bevor ich ihn bekomme. Alle Anleitungen wurden danach überarbeitet; auch die Tasten heißen jetzt so wie auf meinem Mac, control statt Strg.

Was bleibt

Zu den zwei Abenden:

Dass nicht alles auf Anhieb klappt und man mit ein wenig Geduld und Spucke weiterkommt.

KAPITEL 22

Warten auf die Platinen

15. bis 18. Oktober 2026

Die Platinen sind in Produktion. Bis sie kommen, trudelt der Rest ein – und ich bereite vor, was sich vorbereiten lässt.

Ein Paket auf dem Rückweg

Die Teile von LCSC waren am 8. Oktober verschickt worden, kamen aber nicht. Im Konto stand weiter „versandt“. Erst die Verfolgung beim Versanddienst zeigte, dass die Sendung seit dem 13. Oktober auf dem Rückweg zu LCSC war: Der Karton war für die gewählte Versandart zu groß. Nach meiner Mail vom 15. Oktober hat LCSC alles am 16. Oktober neu verschickt, mit einem anderen Versanddienst.

Am 15. Oktober kam dafür Eckstein, vollständig: die beiden Spannungswandler von Pololu, die Temperaturfühler und der Feuchtesensor.

Der Wassermelder

Am 16. Oktober habe ich das kleine Reglermodul geprüft, das später den Wassermelder von Kemo versorgt. Am Labornetzteil mit 11,5 bis 14,4 Volt am Eingang kamen 8,75 bis 9,11 Volt heraus. Selbst verpolt am Eingang lieferte es +9,1 Volt; ein Gleichrichter auf dem Modul macht die Polung egal.

Üben, bevor es ernst wird

Am selben Tag meine Frage:

Ansonsten keinerlei Arbeiten oder Prüfungen, bevor die Platinen da sind?

Daraus wurde zuerst eine Lötübung: eine Übungsplatine von Chip Quik mit denselben feinen Gehäusen wie auf meinen Platinen, darunter ein Baustein mit 64 Beinen im Abstand von einem halben Millimeter wie der Sicherheitscontroller U_SAFE und ein Gehäuse mit Anschlüssen nur an der Unterseite. Bestellt habe ich sie bei eleshop, sie ist unterwegs.

Dann habe ich die beiden Adapter für den Bordbus und für RS-485 am MacBook angesteckt. Der für RS-485 meldet sich als serielle Schnittstelle, der für den Bordbus als USB-Gerät – für ihn braucht der Mac ein eigenes Programm.

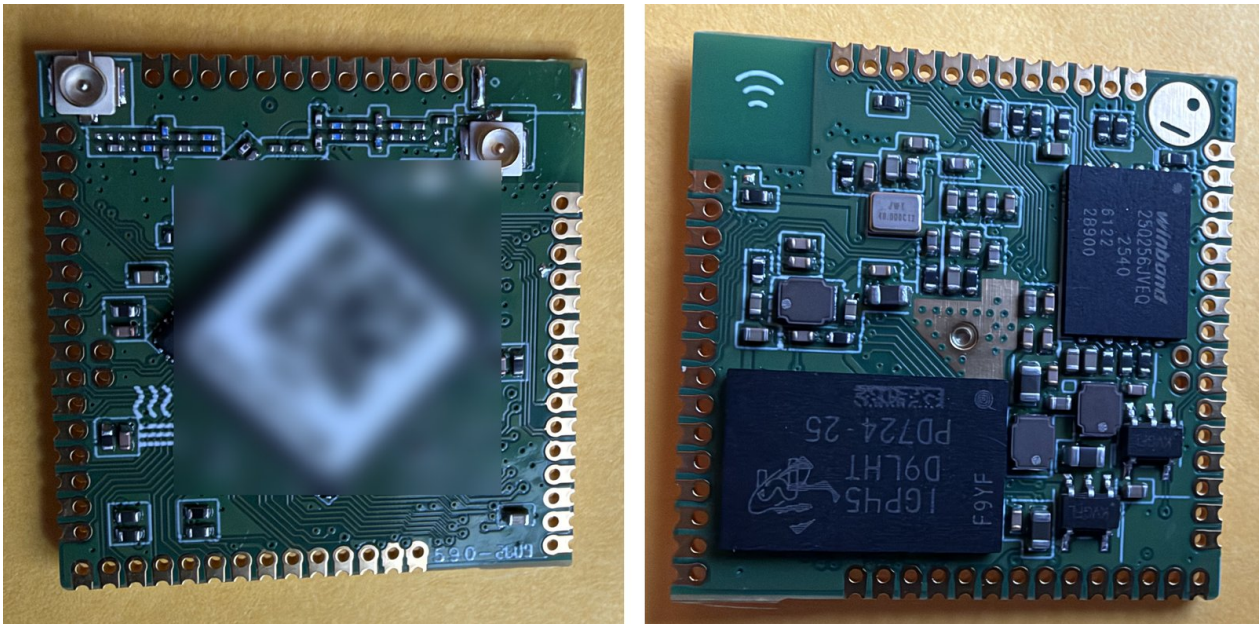
Und weil mir für einige der feinen Bausteine nichts in Reserve blieb, habe ich bei LCSC Ersatz bestellt: den Rechner von U_SAFE, einen Strommesser, Analog- und Pegelwandler. Die Antenne für die Positionsbestimmung, die bei Mouser gefehlt hatte, kam mit dazu – ein anderes Modell, weil das eingeplante nicht lieferbar war.

Der VoCore2

Am 17. Oktober kam ein Päckchen mit einem Modul darin, ohne jede Beschriftung. Meine Frage dazu:

Nur ohne jegliche Beschriftung etc., was ist das und wo gehört der hin?

Auf meinen Fotos hat Claude es erkannt: der VoCore2 mit zwei Antennenbuchsen und 32 Megabyte Speicher, genau die bestellte Ausführung. Bis zum Löten bleibt er trocken im Beutel.



Der VoCore2: links die Seite mit dem Hauptchip, oben die beiden Antennenbuchsen; das Etikett auf dem Chip ist unkenntlich gemacht. Rechts die Unterseite mit dem Speicher. Über die Kontakte am Rand wird das Modul auf die Logikplatine gelötet.

Der Adapter für den Bordbus

Am 18. Oktober bekam der Adapter sein Programm. Der erste Versuch brach ab: Der Mac meldete, am Adapter hänge ein Treiber, und verweigerte den Zugriff. Claude hatte den Ablauf vorher nachgebildet, aber mit einem Adapter, der keinen Treiber meldete. Ein Blick in die Geräteliste des Mac zeigte, dass dort gar keiner hängt – die Meldung war falsch. Mit einer Zeile mehr im Programm lief es: Der Adapter schickt „PELARON“ an sich selbst und bekommt es zurück. Der echte Bus folgt mit der Logikplatine.

Gedruckt und bestellt

Für das Löten und Prüfen lasse ich die Seiten, die sich in den Platinenbüchern geändert haben, neu drucken, dazu die vier Anleitungen zu den Prüfprogrammen und zum Oszilloskop. Die Anmeldung beim Druckdienst klappte trotz zweimal zurückgesetztem Passwort nicht, also habe ich als Gast bestellt.

Aus dieser Dokumentation habe ich die Ausschnitte aus Schaltplan und Leiterplatte herausgenommen, die in den Kapiteln 14 und 16 standen. Später kommen Fotos der fertigen Platinen.

Am Nachmittag habe ich bei Multi-CB nachgesehen: Die drei Platinen sind in Produktion, Versand voraussichtlich am 21. Oktober.

Was bleibt

Zum Warten:

Ich bin sehr ungeduldig, kann es kaum erwarten.