

TESTRAPPORT

Board bring-up

Mainboard 9876, prototypeserie V1

[9876-HW-TR-001]

VOORBEELDRAPPORT

Aan	ExampleCompany B.V.
Van	Jitter B.V.
Datum	18 augustus 2026
Versie	1.0
Product	9876-example-pcb mainboard, V1 (firmware-ID B9876RevA)
Testobjecten	Board 1 en board 2: handmatig geassembleerde V1-prototypes, herbewerkt met de TMUX1109 (zie §3.1)
Testperiode	13 t/m 17 augustus 2026
Testlocatie	Jitter B.V., Delft
Uitgevoerd door	S. de Wit
Basisdocumenten	specificaties.md (eisen HW/FW/COM), test-plan.ods (testplan board bring-up)
Deliverable	DL-004: hardware testprocedure, validatie nieuw geproduceerde PCB

Over dit voorbeeldrapport

Dit is een voorbeeld van een board bring-up rapport zoals wij dat in opdracht opleveren. Opdrachtgever, productnaam, projectnummer en een deel van de meetwaarden zijn in dit voorbeeld vervangen, maar de teststructuur, de vooraf vastgelegde pass-criteria, de meetopstelling en de bevindingen zijn afkomstig uit een werkelijk uitgevoerde bring-up.

Het beschreven **Mainboard 9876** is een regelprint gebaseerd op het Jitter Platform met o.a. een 9-12 V voedingsingang, 4G LTE verbinding, drie PT1000-temperatuuringangen, een PWM-uitgang met terugmelding, twee geschakelde 12 V uitgangen.

Resultaat in het kort

Alle **45 uitgevoerde metingen voldoen aan hun pass-criterium**. De voedingsketen, de PT1000-meetketen, de motoruitgang met feedback, de actuator- en relaisuitgang, het modem en alle debug-voorzieningen zijn functioneel bevonden op beide prototypes.

De bring-up heeft één ontwerpfout aan het licht gebracht: de footprint van de multiplexers op de PT1000-ingangen past bij de TMUX1109 en niet bij de ontworpen TMUX1309A (B4). De V1-prototypes zijn herbewerkt met de TMUX1109 en functioneren daarmee volledig: het ontwerp is gecorrigeerd en als V2 besteld (5 boards). Verder volgt uit de bring-up geen belangrijke schemawijziging. De openstaande punten betreffen de FAULT-terugmelding bij een onbelaste uitgang (B1), de afhandeling daarvan in firmware (B2) en een herhaalmeting van de rimpel onder modembelasting (B3). Klimaat- en EMC-tests vallen buiten de scope van de bring-up en staan als aanbeveling in hoofdstuk 5.

Inhoud

1 Samenvatting	3
2 Testopzet	3
2.1 Testcondities	3
2.2 Meetmiddelen	3
2.3 Testpunten	4
3 Resultaten	4
3.1 Eerste inbedrijfstelling en voedingsrails	4
3.2 Voedingsrimpel	5
3.3 Temperatuurmeting	6
3.4 Motoraansturing	7
3.5 Actuator- en relaisuitgang	8
3.6 Modem en connectiviteit	9
3.7 Debug- en ontwikkelvoorzieningen	10
3.8 Mechanisch	10
4 Bevindingen en acties	10
5 Aanbevolen tests voor serieproductie	11
5.1 EMC (pre-)compliance (HW-009)	11
5.2 Klimaattest -10 – 55 °C (HW-021)	12
5.3 Antenne en netwerkkwaliteit (PLATF-03)	12
5.4 Pre-delivery bench test	12
5.5 Burn-in van 48 uur (HW-002)	12
5.6 Productietest per board	12
5.7 Overige punten	13
6 Conclusie	13
Bijlage A: Herleidbaarheid eisen	14

1 Samenvatting

Na assemblage van de eerste twee prototypes is de board bring-up uitgevoerd volgens het vooraf opgestelde testplan (`test-plan.ods`). De volgorde is opgebouwd van “veilig” naar “volledig”: eerst de kale PCB op een stroombegrensd voeding zonder firmware, vervolgens de afzonderlijke voedingsrails, daarna pas de functionele blokken met testfirmware.

Testblok	Metingen	Resultaat	Board
Eerste inbedrijfstelling en voedingsrails (VAL-01 ... VAL-06)	16	16 × voldoet	1 en 2
Temperatuurmeting, on-board en PT1000 TS1–TS3 (HW-004 ... HW-010)	5	5 × voldoet	2
Motoraansturing PWM en feedback (HW-001, HW-003, HW-011, HW-012)	9	9 × voldoet	1 en 2
Actuator- en relaisuitgang (HW-003, HW-013)	8	8 × voldoet	2
Debug- en ontwikkelvoorzieningen (HW-015 ... HW-018)	4	4 × voldoet	2
Modem en connectiviteit (PLATF-01, PLATF-02)	3	3 × voldoet	2
Totaal	45	45 × voldoet	

Beide boards zijn onafhankelijk van elkaar in bedrijf gesteld. Sommige van de tests zijn op beide of op alleen board 1 of 2 uitgevoerd. Waar beide kolommen in het testplan gevuld zijn, komen de metingen onderling overeen binnen de meetnauwkeurigheid. Beide boards zijn vóór de relevante metingen herbewerkt met de TMUX1109, naar aanleiding van de ontwerpfout die tijdens de allereerste inschakeling boven water kwam (§3.1, bevinding B4).

2 Testopzet

2.1 Testcondities

Alle metingen zijn uitgevoerd bij kamertemperatuur (25 ± 10 °C), met de PCB onbehuisd en zonder conformal coating. De voeding is een labvoeding met instelbare stroombegrenzing, bij elke stap bewust laag gezet zodat een montagefout geen schade kan veroorzaken. Motor, actuator en temperatuursensoren zijn vervangen door dummy-belastingen.

2.2 Meetmiddelen

Middel	Toepassing
Siglent SDS2104X plus DSO (2 GSa/s), 10× passieve probes	Rimpel (AC-koppeling, 20 MHz bandbreedtebegrenzing), pulsvorm en timing van de PWM-uitgang, schakelgedrag van de modemrail
Fluke 115 multimeter	Rail-spanningen. Gekalibreerd tegen een $1000\ \Omega$ 0,1 % referentieweerstand voor het opmeten van de dummy-sensoren
Tenma T2-10495 Labvoeding met instelbare U en I_{lim}	Smoke-test, undervoltage-lockout, omgekeerde polariteit, belastingstests
Dummy PT1000's (vaste weerstanden)	3 × 3-draads dummy met $1\ \Omega$ serieweerstand per draad om lange sensorkabels na te bootsen
Vermogensweerstand	Belasting van actuator- en relaisuitgang tot in de stroombegrenzing
Testfirmware <code>hardware_test_mainboard</code>	Uitlezen van ADC's, PT1000-keten, RTC, SPI-flash, modem en PWM-loopback. Rapportage via RTT

2.3 Testpunten

Punt	Signaal	Punt	Signaal
J10	12 V voedingsingang	TP27	12 V rail (na ingangsfiler)
C88 pad 1	12 V rail, DC-meetpunt	TP18	3,8 V rail (buck, modemvoeding)
J1 pin 4	3,3 V digitaal	R78 pad 2 / C81	3,3 V analoog (AVDD)
TP2	3,8 V geschakelde modemrail	J4	motorconnector (pin 1 feedback, pin 3 PWM-uit)
J9	actuatorconnector (pin 1 actuatorvoeding, pin 2 retour, pin 3 relais)		

3 Resultaten

3.1 Eerste inbedrijfstelling en voedingsrails

De PCB is voor het eerst ingeschakeld zonder firmware, met de stroombegrenzing op 25 mA. Precies hier kwam de enige ontwerpfout van dit project boven water: bij board 1 lag de opgenomen stroom met reset ingedrukt fors boven de verwachting (ca 80mA). Bij nader onderzoek bleken de multiplexers van de PT1000-ingangen warm te worden (zie kader). Ná de rework voldoen beide boards ruim aan het criterium: 17 mA met de microcontroller (zonder firmware, waarschijnlijk in factory bootloader mode) en 10 mA met reset ingedrukt. Daarmee zijn kortsluitingen uitgesloten en is het risico op verdere verkeerd gemonteerde onderdelen minimaal.

Ontwerpfout gevonden bij VAL-01: verkeerde multiplexer-footprint

In het schema is de **TMUX1309A** opgenomen, maar de gebruikte footprint komt qua pinout alleen overeen met de **TMUX1109**, twee niet-uitwisselbare families in dezelfde behuizing. Met de 1309A bestukt liep de ruststroom daardoor ver boven de verwachting en werden beide multiplexers warm.

We hebben de **TMUX1109** nabesteld en op beide V1-prototypes vervangen. Hiermee zijn de boards volledig functioneel. Alle metingen die betrekking hebben op de PT1000-keten zijn uitgevoerd met de TMUX1109.

Qua nauwkeurigheid is de 1109 voor deze toepassing wat overgedimensioneerd (en ook prijzig), maar belangrijker nog is dat deze een minder robuust gedrag bij foutstromen (injection current handling) heeft. Belangrijk bij het opvangen van eventuele surges op de lange temperatuur kabels.

Het ontwerp is daarom gecorrigeerd. De proto-serie van 5 stuks die al bij de assembleur in bestelling was hebben we nog kunnen onderbreken en besteld met het aangepaste **V2** ontwerp. Zodra die binnenkomen zullen we de PT1000-gerelateerde test opnieuw uitvoeren voor de zekerheid.

Test	Meting	Pass-criterium	Board 1	Board 2	Status
VAL-01	Opgenomen stroom bij eerste inschakeling	< 25 mA	17 mA	—	VOLDOET
VAL-01	Opgenomen stroom met reset ingedrukt	< 15 mA	10 mA	—	VOLDOET
VAL-02	12 V ingangsspanning (C88 pad 1)	11,95 – 12,04 V	11,97 V	11,97 V	VOLDOET
VAL-02	3,8 V rail (TP18)	3,73 – 3,85 V	3,797 V	3,782 V	VOLDOET
VAL-02	3,3 V digitaal (J1 pin 4)	3,27 – 3,33 V	3,295 V	3,296 V	VOLDOET
VAL-02	3,3 V analoog (R78 pad 2)	3,27 – 3,33 V	3,303 V	3,297 V	VOLDOET
VAL-02	Modemrail uit als default (TP2)	< 0,5 V	0,001 V	0,001 V	VOLDOET
VAL-03	Undervoltage-lockout, oplopende spanning	3,8 V komt op tussen 8,8 – 9,3 V	9,000 V	—	VOLDOET

Test	Meting	Pass-criterium	Board 1	Board 2	Status
VAL-03	Undervoltage-lockout, dalende spanning	3,8 V valt weg tussen 8,3 – 7,8 V	8,020 V	—	VOLDOET
VAL-05	Omgekeerde polariteit, 0 ... -14 V, I_{lim} 1 mA	C88 pad 1 > -0,5 V	0,001 V	—	VOLDOET
VAL-05	Idem, stapsgewijs 10 mA / 100 mA / 1 A / 5 A	C88 pad 1 > -0,5 V	0,001 V	—	VOLDOET
VAL-06	12 V-meting door de MCU (ADC via deler)	afwijking < 0,2 V	—	12,054 V	VOLDOET

De ingangsbescherming werkt zoals ontworpen: bij omgekeerde polariteit blijft de spanning achter de beveiliging op nul. De undervoltage-lockout schakelt in bij 9,0 V en weer uit bij 8,0 V, circa 1 V hysteresis volgens verwachting. Dit is ontworpen om te voorkomen dat een (ver) inzakkende voeding nog verder overbelast raakt en te voorkomen dat de PCB zijn eigen zekering laat springen. Beter om dan (tijdelijk) uit te vallen totdat de voeding weer in normale bereik komt. De 12 V-meting die de MCU via de on-board spanningsdeler rapporteert (12,054 V, stabiel binnen 9 mV) is eventueel bruikbaar om het wegvallen van spanning te zien aankomen en/of voor telemetrie.

3.2 Voedingsrimpel

De rimpel is onbelast gemeten (modem uitgeschakeld), AC-gekoppeld en met 20 MHz bandbreedtebeperking op de probe. De schakelvoeding werkt in deze toestand in PSM (pulse-skipping) en produceert daardoor bursts met een herhalingsfrequentie van circa 39 kHz in plaats van een continue schakelfrequentie. Dit is normaal gedrag bij vrijwel geen belasting.

Test	Meting	Pass-criterium	Gemeten	Opmerking
VAL-04	Rimpel 12 V rail (TP27)	< 100 mV	25 mV	figuur 1 en 2
VAL-04	Rimpel 3,8 V rail (TP18)	< 50 mV	41 mV	PSM, modem uit, figuur 3
VAL-04	Rimpel 3,3 V digitaal (J1 pin 4)	< 50 mV	3 mV	figuur 4
VAL-04	Rimpel 3,3 V analoog (C81)	< 5 mV	3 mV	figuur 5

De beide 3,3 V-rails onderdrukken de rimpel van de 3,8 V-rail met een factor 14 (digitaal) respectievelijk 13 (analoog): de LDO's doen precies waarvoor ze in de keten zitten, en de analoge rail die de PT1000-meting voedt is met 3 mV_{pp} schoon genoeg voor de beoogde meetnauwkeurigheid.

De 3,8 V-rail zit met 41 mV tegen zijn grens van 50 mV aan. Dat is de ongunstigste conditie voor een schakelvoeding in PSM: nagenoeg onbelast, met alleen 18 μ F aan de uitgang omdat de modem is uitgeschakeld. Onder werkelijke modembelasting schakelt de regelaar naar continu bedrijf en daalt de rimpel: dit wordt herhaald in de pre-delivery test met het strengere criterium van 15 mV (zie hoofdstuk 5 en bevinding B3).



Figuur 1: 12 V rail (TP27), onbelast, 5 mV/div. Pieken van 19 – 25 mV_{pp} tegen een criterium van 100 mV.



Figuur 2: 12 V vóór (J10, roze) en na (TP27, geel) de ingangsbescherming: 15,7 respectievelijk 16,7 mV_{pp}. Het filter onderdrukt scherpe hoogfrequente ruis en dempt binnen enkele cycles uit.



Figuur 3: 3,8 V rail (TP18), 20 mV/div: zaagtandvormige PSM-bursts van 42,7 mV_{pp} bij 39,8 kHz herhaalfrequentie.



Figuur 4: 3,3 V digitaal (geel, 2,67 mV_{pp}) ten opzichte van de 3,8 V rail (roze, 41,3 mV_{pp}): circa 24 dB onderdrukking door de LDO.



Figuur 5: 3,3 V analoge rail bij C81 (geel, 3,00 mV_{pp}) ten opzichte van de 3,8 V rail (roze, 40,7 mV_{pp}). Deze rail voedt de PT1000-meetketen.

3.3 Temperatuurmeting

De drie PT1000-ingangen zijn gemeten met vaste weerstanden als dummy-sensor, elk bedraad als 3-draads sensor met 1 Ω per ader om een lange sensorkabel na te bootsen. De waarde van elke dummy is met een tegen een 0,1 % referentieweerstand gekalibreerde multimeter bepaald, met een onzekerheid van circa 1 Ω . De firmware leest alle drie de kanalen uit en rapporteert de gemeten weerstand.

Test	Meting	Pass-criterium	Board 2	Afwijking	Status
HW-004	On-board temperatuursensor	stabiel binnen 1 °C over 1 minuut, binnen 5 °C van de ruimtetemperatuur	23,8 °C	stabiel binnen 0,08 °C	VOLDOET
HW-005...008	TS1: dummy 938 Ω (≈ -16 °C)	938 ± 2 Ω	937,5 Ω	-0,5 Ω ≈ 0,13 °C	VOLDOET
HW-005...008	TS2: dummy 1000,0 Ω (0 °C)	1000 ± 1 Ω	999,9 Ω	-0,1 Ω ≈ 0,03 °C	VOLDOET
HW-005...008	TS3: dummy 1565 Ω (≈ 148 °C)	1565 ± 2 Ω	1564,6 Ω	-0,4 Ω ≈ 0,10 °C	VOLDOET
HW-010	Mechanische borging connectoren	stevig trekken beïnvloedt de meting niet	geen effect	—	VOLDOET

De grootste afwijking over alle drie de kanalen is 0,5 Ω, oftewel ongeveer 0,13 °C. Dat is kleiner dan de onzekerheid van de referentiemeting zelf ($\pm 1 \text{ } \Omega \approx \pm 0,27 \text{ } ^\circ\text{C}$): de meetketen is nauwkeuriger dan waarmee hij met deze methode te verifiëren is. De eis van $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ binnen 0–100 °C (HW-007) en $\pm 2,45 \text{ } ^\circ\text{C}$ daarbuiten (HW-008) wordt daarmee met een ruime marge gehaald. Overigens was de verwachting een nauwkeurigheid van circa 0,3 °C met de PCB op kamertemperatuur. De rest van het specificatie-budget is gereserveerd voor omgevingsinvloeden (met name PCB temperatuur).

Wat deze test wel en niet aantoont

Getest is de elektrische meetketen (bedrading, multiplexers, ADC, referentie) over het volledige weerstandsbereik van de specificatie. Niet getest zijn de sensoren zelf, het gedrag over de omgevingstemperatuur (HW-021) en de invloed van werkelijke kabels van 15 meter met de bijbehorende EMI (HW-009). Die drie staan in hoofdstuk 5.

3.4 Motoraansturing

De motoruitgang is een high-side geschakelde 12 V PWM-uitgang. De zwaarste eis is de kortste puls: bij 4 kHz en 1 % duty cycle duurt de puls 2,5 μs, en in die tijd moet de uitgang de volledige 12 V halen zonder dat de beveiliging aanspreekt. In de praktijk zal deze korte puls niet strikt nodig zijn, maar het is een goede validatie van het ontwerp t.o.v. de simulatie.

Test	Meting	Pass-criterium	Gemeten	Status
HW-003	Veilige defaulttoestand zonder firmware (reset ingedrukt)	J4 pin 3 < 1 V, geen pulsen	< 0,07 V	VOLDOET
HW-011	Minimale puls, 4 kHz / 1 %, onbelast	> 11 V, breedte 2,5 ± 1 μs, geen FAULT	> 11,5 V, breedte ≈ 2,5 μs (figuur 6)	VOLDOET
HW-011	Minimale puls met 330 Ω belasting	> 11 V, breedte 2,5 ± 1 μs, geen FAULT	> 11,5 V piek, 3,0 μs bij 6 V (figuur 8)	VOLDOET
HW-011	Overbelasting: 220 Ω belasting	FAULT treedt op, uitgang onder 1 V	> 11 V piek, FAULT op de dalende flank	VOLDOET
HW-011	Maximale puls, 100 % duty cycle	constant > 11 V, geen dips	100,0 %	VOLDOET
HW-012	Feedback-loopback, 200 Hz / 1 %	uitgelezen 1 % ± 0,5 %	1,0 %	VOLDOET
HW-012	Feedback-loopback, 200 Hz / 50 %	uitgelezen 50 % ± 0,5 %	50,0 %	VOLDOET
HW-012	Feedback-loopback, 200 Hz / 99 %	uitgelezen 99 % ± 0,5 %	99,0 %	VOLDOET
HW-001	Klokfout van de PWM-tijdbasis (RTC-afgeleid)	< 40 ppm (eis: < 139 ppm)	+30 ppm (3,997816 vs 3,997696 kHz)	VOLDOET

De gemeten pulsvorm komt vrijwel exact overeen met de simulatie die tijdens het ontwerp is gemaakt (figuren 6 en 7): dezelfde snelle stijgflank, hetzelfde platte topniveau en dezelfde langzame, RC-vormige

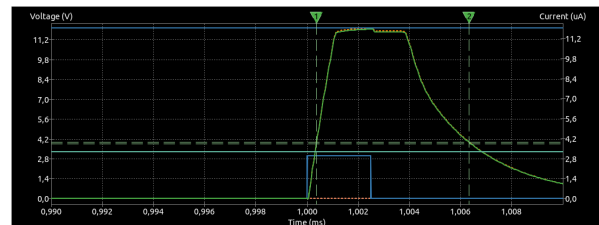
afval. Dat de meting op de werkelijke print het simulatiemodel volgt, betekent dat het gedrag van deze uitgang begrepen en voorspelbaar is en niet toevallig goed uitpakt.

Aandacht verdient de asymmetrie van die puls: de uitgang haalt binnen $2,5\ \mu\text{s}$ de volle spanning, maar is pas na circa $5,5\ \mu\text{s}$ weer onder $4\ \text{V}$. Bij de laagste duty cycles draagt die staart dus mee aan het door de motor waargenomen signaal (zie bevinding B6). Onder belasting verdwijnt het effect grotendeels: met $330\ \Omega$ is de puls bij $6\ \text{V}$ nog maar $3,0\ \mu\text{s}$ breed.

De overbelastingstest met $220\ \Omega$ laat de beveiliging aanspreken zoals bedoeld. Dat de FAULT-melding samenvalt met de dalende flank is verklaarbaar: $220\ \Omega$ is een matige overbelasting die op zichzelf net onder de drempel blijft, waarna de actieve ontlasting (pulldown van $660\ \Omega$) er vlak vóór de dalende flank bijkomt en de totale stroom net over de limiet tilt. De consequentie is praktisch van aard: de melding kan enkele microseconden kort zijn en moet door de firmware als interrupt worden afgehandeld in plaats van gepold (bevinding B2).



Figuur 6: Gemeten minimale puls op J4 pin 3 (4 kHz, 1 %, onbelast), 2 V/div en $2\ \mu\text{s}/\text{div}$. Cursors op $\approx 3,9\ \text{V}$ geven $5,40\ \mu\text{s}$.



Figuur 7: Simulatie van dezelfde puls uit de ontwerpfase (blauw: stuursignaal, groen: uitgang). Vorm en tijdconstanten komen overeen met de meting.



Figuur 8: Minimale puls met $330\ \Omega$ belasting: de staart verdwijnt grotendeels, breedte $3,00\ \mu\text{s}$ op het $5,93\ \text{V}$ -niveau.

3.5 Actuator- en relaisuitgang

De actuatoruitgang levert de $12\ \text{V}$ voeding voor de actuator. De relaisuitgang stuurt de richting. Beide zijn uitgevoerd met een high-side schakelaar met stroombegrenzing en automatische herstart bij overbelasting. De veilige toestand is zo ontworpen dat de actuator bij een niet-functionerende MCU in rusttoestand valt: de actuatorvoeding staat aan, de relaisuitgang uit.

Test	Meting	Pass-criterium	Board 2	Status
HW-003	Veilige default actuatorvoeding (reset ingedrukt)	J9 pin 1 > $11,9\ \text{V}$	$11,99\ \text{V}$, ! PWR_FAULT laag	VOLDOET
HW-003	Veilige default relaisuitgang (reset ingedrukt)	J9 pin 3 < $1\ \text{V}$	$0,003\ \text{V}$	VOLDOET

Test	Meting	Pass-criterium	Board 2	Status
HW-013	Actuatorbelasting > 250 mA gedurende 10 min	> 11,8 V, geen noemenswaardige opwarming	11,89 V bij 298 mA	VOLDOET
HW-013	Actuatorbelasting > 500 mA gedurende 10 min	> 11,5 V, geen noemenswaardige opwarming	11,78 V bij 486 mA	VOLDOET
HW-013	Actuatoroverbelasting (12,5 Ω, ≈ 0,9 A)	uitgang zakt in, PWR_FAULT actief, automatische herstart	herstart automatisch, PWR_FAULT laag	VOLDOET
HW-013	Relaisbelasting > 100 mA gedurende 10 min	> 11,9 V, geen noemenswaardige opwarming	11,94 V bij 122 mA	VOLDOET
HW-013	Relaisoverbelasting (50 Ω, ≈ 0,24 A)	uitgang zakt in, FAULT actief, automatische herstart	herstart automatisch, FAULT laag	VOLDOET
HW-013	Relaisuitgang ingeschakeld zonder belasting (I = 0)	J9 pin 3 > 11,9 V	11,99 V, !FAULT laag	VOLDOET

De gemeten trippunten komen overeen met de ontworpen stroomlimieten: de actuatoruitgang levert 486 mA moeiteloos met slechts 0,22 V verlies en begrenst rond 0,9 A, de relaisuitgang levert 122 mA en begrenst rond 0,24 A. De actuatoreis van minimaal 3 W bij 12 V (≥ 250 mA, HW-013) wordt daarmee met een factor twee gehaald, en na tien minuten continu belasten is er geen noemenswaardige opwarming vastgesteld.

De automatische herstart na overbelasting werkt op beide kanalen. Opvallend is dat beide FAULT-uitgangen óók een melding geven wanneer er niets is aangesloten, terwijl de uitgang dan keurig 11,99 V levert. Dat past bij de open-load-detectie van de high-side schakelaar. De bruikbaarheid van deze feedback als diagnose hangt daarmee af van de stroom die de werkelijke actuator en het werkelijke relais trekken (bevinding B1). Het FAULT-sigitaal is geen eis uit het programma van eisen, maar extra statusinformatie die de firmware kan gebruiken zolang die onderscheidend blijkt. Ook als deze niet als fout-detectie bruikbaar is, kan het zijn dat de firmware op deze manier kan detecteren of de actuator in beweging is.

3.6 Modem en connectiviteit

Test	Meting	Pass-criterium	Board 2	Status
PLATF-01	Verbinding met de backend	succesvolle MQTT-verbinding	verbonden	VOLDOET
PLATF-02	Inschakelen modemrail (TP2)	stabiel binnen 2 ms	1,73 ms	VOLDOET
PLATF-02	Uitschakelen modemrail (TP2)	< 0,3 V binnen 400 ms	147 ms	VOLDOET

Het modem komt tot een werkende MQTT-verbinding met de backend. Daarmee is het nieuwe LTE Cat-1-modem inclusief voeding, level-shifting, SIM en antenne op basisniveau gevalideerd. De geschakelde modemrail komt in 1,73 ms op spanning en ontladst binnen 147 ms tot onder 0,3 V (figuur 9). Die volledige ontlading is belangrijk zodat het bij de volgende inschakeling betrouwbaar opstart, en is een goede basis voor energiebesparing.



Figuur 9: Uitschakelen van de modemrail (TP2), 1 V/div en 50 ms/div: van 3,80 V naar 0,30 V in 147 ms, ruim binnen de 400 ms.

3.7 Debug- en ontwikkelvoorzieningen

Test	Voorziening	Pass-criterium	Board 2	Status
HW-015	Reset-knop	firmware stopt bij indrukken, start bij loslaten	werkt	VOLDOET
HW-016	SWD/JTAG	firmware flasht, RTT-uittezing werkt	werkt	VOLDOET
HW-017	Status-LED	duidelijk zichtbaar	knippert	VOLDOET
HW-018	Seriële debug-uitvoer	bruikbare debug-uitvoer via RTT of UART	RTT werkt	VOLDOET

3.8 Mechanisch

Test	Meting	Pass-criterium	Resultaat	Status
HW-020	Conformal coating	volledige PCB gecoat, behalve connectorinterfaces	prototypes zijn niet gecoat, te inspecteren op de eerste PCBA-batch	OPEN

4 Bevindingen en acties

Nr	Bevinding	Actie	Status
B1	Beide FAULT-uitgangen van de actuator- en relaisdriver melden een storing zodra er géén belasting is aangesloten: de uitgang levert dan 11,99 V terwijl !PWR_FAULT respectievelijk !FAULT laag blijft. Bij werkelijke overbelasting gedragen beide zich zoals bedoeld (uitgang zakt in, automatische herstart). Het gedrag past bij de open-load-detectie van de high-side schakelaar.	Vaststellen of de werkelijke actuator en het werkelijke relais genoeg stroom trekken om boven de open-load-drempel uit te komen, pas dan is het signaal onderscheidend. Het signaal is geen eis maar extra statusinformatie: blijkt het niet bruikbaar, dan laat de firmware het buiten beschouwing.	OPEN
B2	Bij de overbelastingstest van de motoruitgang (220 Ω) treedt FAULT pas op tijdens de dalende flank van de PWM. Verklaring: deze matige overbelasting blijft op zichzelf net onder de drempel, en de actieve ontlading (pulldown van 660 Ω) komt er vlak vóór de dalende flank bij en tilt de stroom net over de limiet. De detectie werkt dus zoals bedoeld, maar de melding kan zeer kort zijn.	Firmware handelt FAULT af als interrupt en houdt de gebeurtenis vast, pollen kan een puls van enkele microseconden missen.	AANDACHT

Nr	Bevinding	Actie	Status
B3	De rimpel op de 3,8 V-rail bedraagt 41 mV bij een criterium van 50 mV. De meting is gedaan in de ongunstigste conditie (onbelast, PSM, modem uit, slechts 18 μ F uitgangscapaciteit).	Herhalen onder werkelijke modembelasting in de pre-delivery test, met het strengere criterium van 15 mV. Pas als die meting ook krap uitvalt is een ontwerpaanpassing aan de orde.	AANDACHT
B4	Ontwerpfout: de footprint van de multiplexers op de PT1000-ingangen past bij de TMUX1109, terwijl de TMUX1309A is ontworpen en besteld (issue #17). Gevonden bij VAL-01 door een te hoge ruststroom met reset ingedrukt en warm wordende multiplexers. De V1-prototypes zijn herbewerkt met de TMUX1109 en functioneren volledig, maar dat is een duurdere en overgedimensioneerde onderdeelkeuze. De 1309 is gekozen om zijn foutstroomgedrag, dat meetelt in de surge-vastheid van de temperatuuringangen.	Ontwerp gecorrigeerd en als V2 besteld (5 boards). Op de eerste V2-board VAL-01 en de PT1000-keten opnieuw meten. Preventief: de koppeling symbool $\rightarrow$ footprint $\rightarrow$ MPN als controle opnemen in de hardware-CI (attestatedatabase).	AANDACHT
B5	De klokfout van de RTC-afgeleide tijdbasis bedraagt +30 ppm, tegen een eis van 139 ppm (0,5 s per uur). De theoretisch-ideale belastingscapaciteit om het kristal binnen 10ppm te krijgen is in de praktijk niet haalbaar, gedrag is vergelijkbaar met andere Jitter-hardware.	Geen actie. Ruim binnen de eis, wordt door firmware weggekalibreerd en de tijd wordt bovendien periodiek via de server gesynchroniseerd.	GEEN ACTIE
B6	De PWM-puls stijgt binnen 2,5 μ s naar 12 V maar valt pas na circa 5,5 μ s onder 4 V. Bij de laagste duty cycles is de door de motor waargenomen puls daardoor breder dan ingesteld. Het gedrag komt overeen met de simulatie en verdwijnt grotendeels onder belasting.	Geen actie. Nauwkeurige 1%-PWM bij 4kHz is in de praktijk niet kritiek. Indien nodig kan de firmware compenseren door expres een iets te smalle puls uit te sturen. Maar de meeste motoren hebben in de praktijk een hoger minimum duty-cycle dan 1%.	OPEN

5 Aanbevolen tests voor serieproductie

De bring-up beperkt zich tot de elektrische werking van de board op de werkbank. De tests hieronder vallen daar bewust buiten: ze vragen óf een faciliteit die wij niet in huis hebben, óf zijn pas zinvol op het complete product in behuizing. Ze horen dus niet bij de bring-up, maar wel bij het traject naar serieproductie. Per onderwerp staat wat de test aantoont, wat ervoor nodig is en wat wij adviseren.

5.1 EMC (pre-)compliance (HW-009)

Wat het aantoont: dat de PT1000-ingangen en de voedingsingang bestand zijn tegen geleide immuniteit (IEC 61000-4-6), surge (61000-4-5) en burst, en dat de board niet te veel uitstraalt of gevoelig is voor radiogolven. Goed om extra zekerheid te krijgen over de betrouwbaarheid en helpt bij het opstellen van het CE-compliance dossier.

Wat ervoor nodig is: wij hebben geen eigen EMC-lab. De volwaardige variant is een full-CE-compliance test bij een extern EMC-huis, met bijbehorende kosten en doorlooptijd, van het gehele geassembleerde product (in behuizing, met alle aansluitingen die erbij horen). Een goedkopere tussenstap is een beperkte pre-compliance scan van bijvoorbeeld een dag(deel).

Advies: het ontwerp is expliciet op deze normen gedimensioneerd (TVS-diodes op alle kabelingangen, gescheiden filtering per ingang). Plan de externe test op het moment dat behuizing en kabelboom definitief zijn. Losse metingen op een kale print zeggen weinig over het eindresultaat, juist de kabels en behuizing zijn belangrijk voor het gedrag.

5.2 Klimaattest –10 – 55 °C (HW-021)

Wat het aantoont: dat het product inclusief de PT1000-metingen, PWM, kloknaauwkeurigheid, modem hun specificatie halen over het volledige bedrijfstemperatuurbereik van het product.

Wat ervoor nodig is: een klimaatkast, of de geïmproviseerde variant uit het testplan: de board in een vrieskist tot hij onder –10 °C rapporteert en daarna in een oven tot boven 50 °C, met de testfirmware die sensoren en PWM-loopback logt. Dat is technisch uitvoerbaar, maar arbeidsintensief: kabeldoorvoeren, mogelijke condensatie, lange stabilisatietijden en hoe de temperatuur netjes te regelen.

Advies: In overleg bepalen of en hoe we dit willen uitvoeren. Alternatief kan zijn om te kijken hoe warm het apparaat in de praktijk worst-case wordt mbv de onboard temperatuur sensor (telemetrie) en of er afwijkend gedrag plaats vindt in die situatie.

5.3 Antenne en netwerkkwaliteit (PLATF-03)

Wat het aantoont: dat de antenne in de werkelijke montagesituatie voldoende aangepast is, en dat het modem in het veld een bruikbare verbinding houdt.

Wat ervoor nodig is: een VNA-meting (S11/VSWR) op een volledig gemonteerd apparaat. Losse metingen aan de kale print zijn niet representatief: behuizing, montagepositie, kabelrouting en het metaal in de omgeving bepalen samen de uiteindelijke aanpassing. Het aanpasnetwerk op de board is met vijf elementen voorbereid om hierop bij te stemmen.

Advies: de antennemeting pas uitvoeren in de context van het volledige product, en zo nodig het aanpasnetwerk dan opnieuw afregelen. Tot die tijd is de netwerkkwaliteit die het modem zelf rapporteert (signaalsterkte en -kwaliteit, gelogd via telemetrie tijdens de veldtest) de goedkoopste en meest realistische indicator.

5.4 Pre-delivery bench test

Wat het aantoont: het gedrag van de voeding onder werkelijke belasting: rimpel op de 12 V (< 100 mV) en op de 3,8 V rail (< 15 mV) met actief modem, en de stapresponsie van de 3,8 V rail tijdens het opstarten van het modem (blijft binnen 3,4 – 4,2 V). Deze test sluit bevinding B3 af.

Wat ervoor nodig is: de complete opstelling op een labvoeding met overstroombeveiliging op 1,9 A, met temperatuursensoren, motor en actuator (of dummy-belastingen) aangesloten, en firmware die modem en regellus tegelijk draait.

Advies: uitvoeren zodra de firmware-integratie op het prototype rond is: dit is de logische opvolger van de bring-up en vraagt geen extra faciliteiten.

5.5 Burn-in van 48 uur (HW-002)

Wat het aantoont: stabiliteit over langere tijd: geen resets, geen aanspreken van de overstroombeveiliging, en bevestiging dat het vermogensbudget binnen de 12 V / 2,0 A van de externe voeding blijft.

Wat ervoor nodig is: dezelfde opstelling als de pre-delivery test, 48 uur onbewaakt, met logging van telemetrie en resetoorzaken.

Advies: combineren met de pre-delivery test en direct erna laten doorlopen.

5.6 Productietest per board

Wat het aantoont: dat elk geproduceerd exemplaar na assemblage volledig functioneert. Dit rapport valideert het ontwerp, de productietest valideert de individuele boards, bij voorkeur nog bij de PCBA-leverancier.

Wat ervoor nodig is: de testfirmware die voor deze bring-up is geschreven, uitgebouwd tot een self-test: railspanningen en stroomopname, de drie PT1000-kanalen met dummy-weerstanden in de connector, PWM-loopback (pin 3 naar pin 1) en een modemverbinding. Verder alleen een testkabelset met de dummy-sensoren en de loopback-draad.

Advies: de uitslag zichtbaar maken op de status-LED (aan = geslaagd) en de gemeten waarden meesturen als log over UART, zodat een afkeur bij de assembleur herleidbaar blijft zonder debugger. Uit te werken zodra de serieproductie start.

5.7 Overige punten

Onderwerp	Toelichting
Verificatie van de V2-boards (B4)	Op de gecorrigeerde V2-serie moeten VAL-01 (ruststroom) en de PT1000-keten (HW-005...008) opnieuw worden gemeten, nu met de TMUX1309A op de juiste footprint. De overige metingen blijven ongewijzigd geldig.
Lange sensorkabels (HW-006, HW-009)	De meetketen is met dummy's over het volledige weerstandsbereik geverifieerd, maar nog niet met een werkelijke kabel van 15 meter. Aan te bevelen als korte aanvullende meting met de definitieve kabel en sensor, gecombineerd met de EMC-sessie.
Conformal coating (HW-020)	De handgebouwde prototypes zijn niet gecoat. Te inspecteren op de eerste PCBA-batch.

6 Conclusie

Beide prototypes van het 9876-mainboard functioneren. Alle 45 uitgevoerde metingen voldoen aan hun pass-criterium, en op de belangrijkste punten met ruime marge: de PT1000-meetketen is nauwkeuriger dan met het beschikbare referentiemateriaal te verifiëren is, de actuatoruitgang levert het dubbele van de vereiste stroom, en de ingangsbescherming werkt zoals verwacht. De veilige defaulttoestanden zijn hardwarematig aangetoond zonder dat er firmware draait, en het gemeten gedrag van de motoruitgang komt overeen met de simulatie uit de ontwerpfase.

De bring-up leverde één ontwerpfout op, de multiplexer-footprint (B4). Die is gecorrigeerd en als V2 besteld. De V1-prototypes draaien met een rework. Verder volgt uit de metingen geen wijziging aan het schema. Aanbevolen vóór serieproductie:

1. **Terugmelding van de actuatordriver beoordelen met de werkelijke actuator en relais (B1).**
Bepaalt of FAULT bruikbaar is als diagnose: de beveiliging zelf werkt hoe dan ook, en het signaal is geen eis.
2. **FAULT in firmware als interrupt afhandelen (B2):** de melding kan enkele microseconden kort zijn.
3. **V2-boards verifiëren (B4):** VAL-01 en de PT1000-keten opnieuw meten op de gecorrigeerde serie, met de TMUX1309A op de juiste footprint.
4. **Pre-delivery test en burn-in uitvoeren:** sluit bevinding B3 af en bevestigt het vermogensbudget.

De hardware is daarmee vrijgegeven voor firmware-integratie en veldtest. Voor vrijgave richting serieproductie resteren de tests uit hoofdstuk 5, waarvan de EMC- en klimaattest het beste op het complete product in behuizing worden uitgevoerd.

Opgesteld door	Datum
S. de Wit, Jitter B.V.	18 augustus 2026

Bijlage A: Herleidbaarheid eisen

Koppeling tussen de eisen uit `specificaties.md` en de uitgevoerde tests.

Eis	Omschrijving	Test	Status
HW-001	RTC-afwijking ≤ 139 ppm	HW-001: +30 ppm	VOLDOET
HW-002	Voeding 12 V / 2,0 A toereikend	Burn-in, nog uit te voeren	OPEN
HW-003	Actuatoruitgangen hardwarematig veilig by default	HW-003-P, HW-003-V	VOLDOET
HW-004	On-board temperatuursensor	HW-004: 24,5 °C	VOLDOET
HW-005	3 × PT1000-aansluiting TS1–TS3	HW-005...008	VOLDOET
HW-006	Meetbereik -20 ... +150 °C	HW-005...008: dummy's 938 – 1565 Ω	VOLDOET
HW-007	Nauwkeurigheid ± 1 °C (0 – 100 °C)	HW-005...008: $\leq 0,13$ °C afwijking	VOLDOET
HW-008	Nauwkeurigheid $\pm 2,45$ °C daarbuiten	HW-005...008: $\leq 0,13$ °C afwijking	VOLDOET
HW-009	Geschikt voor kabellengte tot 15 m incl. EMI	EMC pre-compliance, nog uit te voeren	OPEN
HW-010	Mechanische borging sensorconnector	HW-010	VOLDOET
HW-011	PWM-uitgang 20 – 4000 Hz, stappen < 0,25 %	HW-011: 1 % ... 100 % bij 4 kHz	VOLDOET
HW-012	PWM-feedback, tijdfout < 100 μs	HW-012: 1 / 50 / 99 % loopback	VOLDOET
HW-013	Actuatoruitgang ≥ 3 W bij 12 V (≥ 250 mA)	HW-013: 486 mA bij 11,78 V	VOLDOET
HW-014	Motoruitgang stuurt een belasting van 220 Ω ... 1 kΩ (12 mA ... 55 mA) aan, > 11 V over de volle pulsbreedte	HW-011: 330 Ω, > 11,5 V piek	VOLDOET
HW-015	Reset-knop	HW-015	VOLDOET
HW-016	SWD/JTAG-interface	HW-016	VOLDOET
HW-017	Status-LED	HW-017	VOLDOET
HW-018	Seriële debug-uitvoer	HW-018: RTT	VOLDOET
HW-019	Motoruitgang begrenst bij overbelasting en meldt dit terug via FAULT, zonder blijvende schade	HW-011: 220 Ω, FAULT actief	VOLDOET
HW-020	Conformal coating	Te inspecteren op PCBA- batch	OPEN
HW-021	Bedrijf van -10 – 55 °C	Klimaattest, nog uit te voeren	OPEN
COM-001	4G/LTE-verbinding	PLATF-01: verbonden	VOLDOET
COM-002	MQTT richting server	PLATF-01: verbonden met backend	VOLDOET
FW-012	Modem tussendoor uitschakelbaar	PLATF-02: 1,73 ms aan, 147 ms uit	VOLDOET