

Schaltungsentwurf und Prüfschritte · Vierdraht-Pt100 · 25. August 2026

Ziel: Mit einem Mikrocontroller Aderbruch, Vertauschung, Kurzschluss und falschen Sensortyp erkennen — und gültige Permutationen automatisch auf eine Kelvin-Messung umlegen.

6

Paarmessungen C(4,2)

24

Ader-Permutationen

16

davon kelvinfähig

8

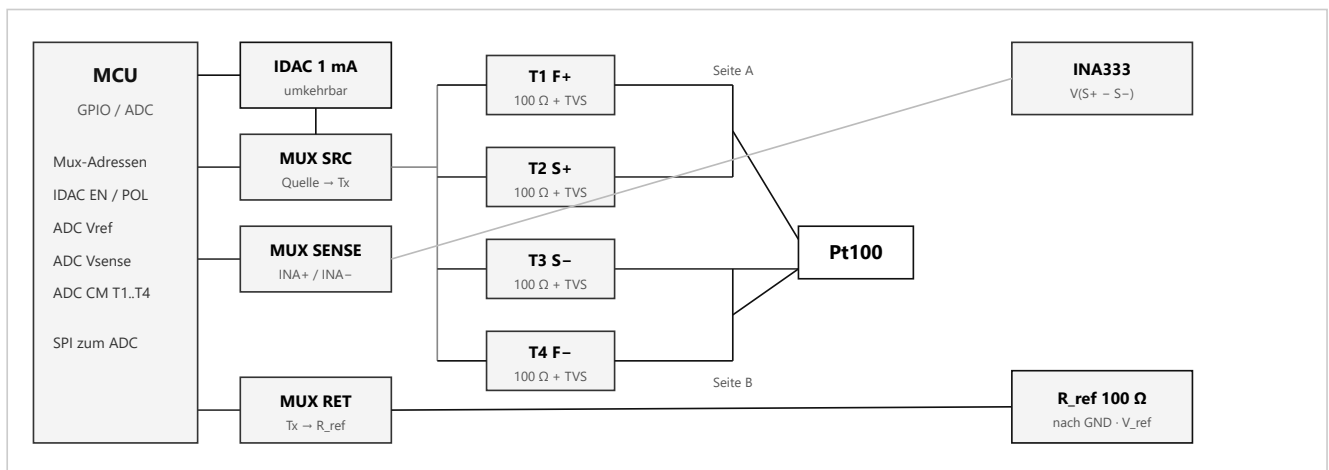
Strom auf einer Seite

Kernidee

Am Pt100-Kopf sind je zwei Adern auf derselben Elementseite galvanisch verbunden. An der Klemme sind deshalb genau zwei Paare niederohmig (Leitungswiderstand) und vier Paare $\approx 100 \, \Omega$. Welche zwei Paare niedrig sind, verrät die Topologie — unabhängig von der Beschriftung F+/S+/F-/S-.

1. Messfront-End

Vier Klemmen T1...T4 werden als vollständige Analogmatrix betrieben: Strom darf auf jeder Ader ein- und aussteigen, Spannung darf zwischen jedem Paar gemessen werden. Die Namen F+/S+/F-/S- sind nur die Soll-Belegung; die Firmware ermittelt die echte Gruppierung.



Strompfad 1 mA ratiometrisch über R_{ref}. Sense über INA/ADC mit PGA. Schutz und 100-kΩ-Abgriffe bleiben immer an den Klemmen.

Klemmen und Rollen

Klemme	Soll	Funktion
T1	F+	Stromquelle, Seite A
T2	S+	Sense hochohmig, Seite A
T3	S–	Sense hochohmig, Seite B
T4	F–	Stromrückführung über R_ref

Dimensionierung

Block	Wert	Warum
I_exc	1,00 mA	0,1 mW am Pt100, wenig Eigenerwärmung
R_ref	100 Ω 0,1 %	$R_{pt} = R_{ref} \cdot V_{sense} / V_{ref}$
R_prot	100 Ω	je Ader, TVS + Klemmdioden
R_tap	100 kΩ	Gleichtakt / Fremdspannung / Open
PGA	×8...×16	Leitungsabfall 1–20 mV auflösen
t_settle	2–5 ms	Kabelkapazität, INA, Mux

Stückliste (diskrete Variante)

Teil	Vorschlag	Rolle
MCU	STM32G4 / RP2040 (12-bit reicht zur Diagnose)	Mux, Ablauf, Schwellen
ADC	ADS1220 oder ADS124S08	24-bit, optional 2× IDAC intern
IDAC	REF200, Howland (OPA192 + 2,49 kΩ) oder ADC-IDAC	1 mA, umkehrbar
Mux	3× TMUX1134 oder 1× ADG1414	Quelle, Rückführung, Sense A/B
INA	INA333	V _{sense} , hohe Gleichtaktunterdrückung
Schutz	100 Ω + SMAJ5.0A + BAT54S je Ader	ESD, Verpolung, 24-V-Fehlstecker

Produktionsalternative

Der ADS124S08 bündelt zwei IDACs, Mux, Burnout-Strom und 24-bit-ADC. Die Diagnose-Logik bleibt dieselbe; nur die Schalter sitzen im Chip. MAX31865 erkennt Open/Overvoltage, unterscheidet Vertauschungen aber nicht zuverlässig — dafür braucht es die Paarmatrix.

2. Paarmatrix — was „gut“ bedeutet

Sechs Messungen reichen. Strom 1 mA in ein Paar, Spannung am selben Paar, Klassifikation in Bänder. Referenz bei 25 °C: Pt100 ≈ 109,7 Ω, Leitung je 1–10 Ω.

Paar	Soll bei korrekter Vierleiter	Bedeutung
F+ – S+	LOW (2 × R _{Leitung})	beide auf Elementseite A
F– – S–	LOW (2 × R _{Leitung})	beide auf Elementseite B
F+ – F–	PT (~110 Ω)	Strompfad durch das Element
S+ – S–	PT (~110 Ω)	Sensepfad durch das Element
F+ – S–	PT (~110 Ω)	Kreuzpfad A→B
S+ – F–	PT (~110 Ω)	Kreuzpfad A→B

Schwellen bei I = 1 mA: SHORT U < 0,2 mV · LOW 0,2–15 mV · PT 80–180 mV · PT1000 0,8–1,2 V · OPEN U ≈ Compliance (> 2,5 V) oder I ≈ 0. 12-bit bei 3,3 V reicht für diese Klassen, nicht für 0,1 °C.

3. Prüfschritte in der Firmware

Gesamtdauer typisch 40–80 ms inklusive Settling. Kein Schritt darf den nächsten starten, wenn Überspannung oder Erdschluss anliegt.



1. 0 — Sicherheit, noch ohne Erregerstrom

Alle Mux-Schalter aus. ADC an den vier 100-kΩ-Abgriffen. Liegt eine Klemme unter –0,3 V oder über VCC + 0,3 V: HARD_FAULT, IDAC gesperrt. Danach 100-kΩ-Pulldown: eine Klemme, die nicht gegen 0 V fällt, führt Fremdspannung oder Erdschluss.

2. 1 — Sechs Paarmessungen

Für jedes der C(4,2)-Paare: Quelle auf Ader i, Rückführung auf Ader j, 1 mA für 3 ms, V_{paar} und V_{ref} lesen, klassifizieren. Danach Strom aus. Ergebnis: sechs Symbole {SHORT, LOW, PT, PT1000, OPEN}.

3. 2 — Topologie ableiten

Genau zwei LOW und vier PT: Vierleiter gefunden, die zwei LOW-Paare sind die Elementseiten. Ein LOW, zwei PT, drei OPEN: Dreier. Drei OPEN an einem gemeinsamen Knoten: Aderbruch dieser Klemme. Sechs OPEN: nichts angeschlossen. $\geq$ drei SHORT/LOW über Kreuz: Element- oder Aderkurzschluss.

4. 3 — Strompfad legen

Strom immer von einer Ader der Gruppe A zu einer Ader der Gruppe B. Die zwei restlichen Adern werden Sense. Damit sind alle 16 kelvinfähigen Permutationen heilbar, inklusive „beide Stromadern auf einer Seite“ an den Soll-Klemmen.

5. 4 — Kelvin-Verifikation

I über R_ref muss 0,95–1,05 mA sein. $|V_{\text{sense}}|$ in 18–390 mV (Pt100, ca. $-200 \dots +850$ °C). Leitungsspannungen 0,2–40 mV. Gleichtakt aller vier Knoten im ADC-Bereich. V_{sense} -Vorzeichen merken und ggf. Sense-Kanäle tauschen.

6. 5 — Strom umkehren und mitteln

Quelle und Rückführung tauschen, erneut messen, Mittelwert. Unterdrückt Thermospannungen an den Klemmen (typisch μV bis zehn μV , bei 1 mA schon 0,01–0,1 °C). Abweichung der beiden Polaritäten $> 2\%$: intermittierender Kontakt oder Gleichspannung auf der Leitung.

7. 6 — Plausibilität und Fehlercode

$R = R_{\text{ref}} \cdot |V_{\text{sense}}| / V_{\text{ref}}$. Pt1000-Band separat melden. $\text{Lead-R} = V_{\text{lead}} / I$; $> 40 \Omega$ als hohe Übergangswiderstände werten. Periodisch Schritt 0+1 im Hintergrund (z. B. 1 Hz), damit ein Aderbruch während des Betriebs nicht als Temperatur rampt.

4. Fehlersignaturen

Referenzwerte bei 25 °C und 1 mA, sofern nicht anders angegeben. Paarklassen: LOW 0,2–15 Ω · PT 80–180 Ω · PT1000 800–1200 Ω · OPEN $> 20 \text{ k}\Omega$ · SHORT $< 0,2 \Omega$.

Korrekt — Vierleiter in Ordnung

F+/S+ an Seite A, F–/S– an Seite B. Strom fließt durch das Pt100, Sense liegt kelvinrichtig am Element.

F+–S+: **LOW**

F––S–: **LOW**

F+–F–: **PT**

S+–S–: **PT**

F+–S–: **PT**

S+–F–: **PT**

$I = 1,00 \text{ mA} \cdot V_{\text{sense}} = +110 \text{ mV} \cdot V_{\text{lead+}} / V_{\text{lead-}} = 1\text{--}20 \text{ mV}$. Keine Korrektur nötig. Temperatur aus $R = V_{\text{sense}} / I$.

Polarität — Seiten von Strom oder Sense getauscht

Strom fließt durch das Element, Sense-Plus liegt auf der Strom-Minus-Seite. Betrag stimmt, Vorzeichen ist negativ.

F+–S+: **PT**

F––S–: **PT**

F+–F–: **PT**

S+–S–: **PT**

F+–S–: **LOW**

S+–F–: **LOW**

$I = 1,00 \text{ mA} \cdot V_{\text{sense}} = -110 \text{ mV}$. Firmware nimmt $|V_{\text{sense}}|$ oder tauscht die Sense-Mux-Eingänge. Messung bleibt richtig.

Strom eine Seite — beide Stromadern auf derselben Elementseite

F+ und F− sitzen auf Seite A, beide Senseadern auf Seite B. Der Strom umgeht das Pt100, V_{sense} bricht auf ~0 ein. Klassischer Steckerfehler.

F+−S+: PT	F−−S−: PT	F+−F−: LOW
S+−S−: LOW	F+−S−: PT	S+−F−: PT

$I = 1,00 \text{ mA} \cdot V_{\text{sense}} \approx 0 \text{ mV}$. Heilbar: Mux umlegen, Strom z. B. $F+ \rightarrow S+$, Sense zwischen F− und S−.

Bruch F+ — Stromader Plus unterbrochen

T1 (F+) ist offen. Kein Stromkreis. Die drei Paare mit F+ sind hochohmig.

F+−S+: OPEN	F−−S−: LOW	F+−F−: OPEN
S+−S−: PT	F+−S−: OPEN	S+−F−: PT

$I < 5 \mu\text{A} \cdot V_{\text{sense float/Rail}}$. Nicht heilbar ohne die Ader. Meldung: Aderbruch F+ (Klemme T1).

Bruch S+ — Senseader Plus unterbrochen

T2 (S+) offen. Stromkreis über F+/F− bleibt, die Sense-Leitung floatet.

F+−S+: OPEN	F−−S−: LOW	F+−F−: PT
S+−S−: OPEN	F+−S−: OPEN	S+−F−: PT

$I = 1,00 \text{ mA} \cdot V_{\text{sense Rail/undefiniert}}$. Optional 3-Leiter-Fallback: Sense+ intern auf F+ legen. Sonst Fehler S+ offen.

Kurz Element — Pt100 überbrückt oder Adern A–B kurzgeschlossen

Seite A mit Seite B verbunden. Alle sechs Paare sind niederohmig, Kelvin-Spannung ~0 bei vollem Strom.

F+−S+: LOW	F−−S−: LOW	F+−F−: SHORT
S+−S−: SHORT	F+−S−: SHORT	S+−F−: SHORT

Unterscheidet sich von „Strom eine Seite“: dort bleiben vier Paare im Pt100-Band. Nicht heilbar.

Pt1000 — falscher Sensortyp

Vierleiter-Topologie stimmt, aber das Element ist ~1000 Ω statt ~100 Ω.

F+−S+: LOW	F−−S−: LOW	F+−F−: PT1000
S+−S−: PT1000	F+−S−: PT1000	S+−F−: PT1000

$I = 1,00 \text{ mA} \cdot V_{\text{sense}} \approx 1,10 \text{ V}$. Als Pt1000 rechnen oder Fehler „falscher Typ“. Nicht als Verdrahtung werten.

Dreiader — 3-Leiter-Fühler an 4-Klemme

Zwei Adern auf einer Elementseite, eine Ader auf der anderen, eine Klemme leer (hier: F− unbeschaltet, S− ist die Gegenader).

F+−S+: LOW	F−−S−: OPEN	F+−F−: OPEN
S+−S−: PT	F+−S−: PT	S+−F−: OPEN

Genau ein LOW, zwei PT, drei OPEN. 3-Leiter-Modus: Strom $F+ \rightarrow S-$, Sense zwischen S+ und S−, eine Leitung doppelt abziehen.

Erdschluss — Ader gegen Schirm/GND

Eine Ader liegt niederohmig gegen Geräte-GND oder führt Fremdspannung. Zeigt sich vor der Paarmessung am Gleichtakt-Abgriff.

F+-S+: **LOW**

F--S-: **LOW**

F+-F-: **PT**

S+-S-: **PT**

F+-S-: **PT**

S+-F-: **PT**

Paarmatrix kann „ok“ aussehen. Verräter ist Schritt 0: Gleichtakt einer Klemme klebt an 0 V oder > VCC trotz Hi-Z. Nicht messen.

5. Entscheidungsregeln

Bedingung nach Schritt 1	Fehlercode	Nächste Aktion
2× LOW auf F+-S+ und F--S-, 4× PT	OK	Kelvin auf Soll-Klemmen
2× LOW auf F+-S- und S+-F-, 4× PT	POLARITY	Sense tauschen oder Betrag
2× LOW auf F+-F- und S+-S-, 4× PT	FORCE_SAME_SIDE	Mux: Strom F+ → S+, Sense F-/S-
3× OPEN, gemeinsamer Knoten Tx	OPEN_Tx	Ader Tx, kein Messen
I ≈ 0 auf F+-F-, S+-S- bleibt PT	OPEN_FORCE	Stromader, 3-Leiter-Fallback prüfen
I ok, alle Paare mit Sx = OPEN	OPEN_SENSE	Senseader, optional Force als Sense
≥ 4 Paare SHORT/LOW, keine PT-Quere	SHORT_ELEMENT	Sperren
2× LOW, 4× PT1000	WRONG_TYPE	Pt1000-Kurve oder Fehler
1× LOW, 2× PT, 3× OPEN	WIRE_3	3-Leiter-Kompensation
6× OPEN	UNPLUGGED	kein Fühler
Schritt 0: CM an Rail oder ≠ 0 bei Hi-Z	EARTH_OR_OV	IDAC aus, Hardwarefehler

6. Firmware-Kern (Klassifikation)

Ratiometrisch arbeiten, nicht die Stromquelle als wahr annehmen. Der Shunt verrät Opens und Erdschlüsse, die der ADC am Sense sonst als Temperatur interpretieren würde.

```
R = Rref * fabsf(Vsense) / Vref;
if (Iref < 50e-6f)
    fault = OPEN_FORCE;
else if (fabsf(Vsense) < 0.5e-3f && Iref > 0.9e-3f)
    fault = SHORT_OR_FORCE_SAME_SIDE;
else if (R > 700.f && R < 1400.f)
    fault = WRONG_TYPE_PT1000;
else if (R < 18.f || R > 390.f)
    fault = OUT_OF_RANGE;
else
    /* Kelvin ok, Polarität = sign(Vsense) */
```

Was die Paarmatrix nicht sieht

Ein Kurzschluss zwischen den zwei Adern derselben Elementseite am Stecker ist galvanisch dasselbe wie die Verbindung am Fühlerkopf. Die Temperatur stimmt weiter, nur die Leitungskompensation dieser Seite endet am Kurzschluss statt am Element. Dagegen helfen nur erwartete Lead-R (Kabeltabelle) oder ein Isolationsmessgerät. Thermopaar-EMK an den Klemmen braucht Stromumkehr (Schritt 5).

