

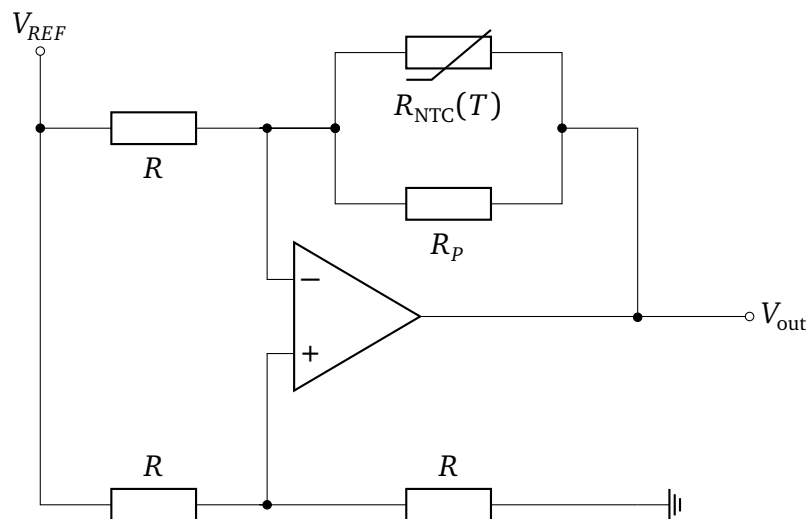
Vorbereiding op het practicum

Deze opdracht bevat uitgebreide berekeningen en tekenwerk. Zorg ervoor dat je deze gedaan hebt voor het practicum of je er gerichte vragen over kunt stellen, zodat je optimaal van de practicumles gebruik kunt maken.

Inleiding

Deze week ligt de focus op ontwerp en realisatie van een voorbeeld van een sensorcircuit. Dit circuit bevat de volgende onderdelen:

- Een NTC
- Linearisatie met een shuntweerstand
- Een lineair bridge-circuit



Schakeling 1: NTC in een lineair bridge-circuit

De eerste drie onderdelen van deze opdracht, de NTC met een shuntweerstand in een lineair bridge-circuit, zijn weergegeven in [schakeling 1](#). Deze schakeling zal zo ontworpen worden dat temperaturen tussen de -20°C en $+40^{\circ}\text{C}$ gemeten kunnen worden, waarbij de niet-lineaire effecten zo veel mogelijk worden onderdrukt.

Een NTC is een weerstand $R_{\text{NTC}}(T)$ die temperatuurafhankelijk is, waarbij de weerstand kleiner wordt als de temperatuur hoger wordt. (Vandaar ook de naam: Negative Temperature Coefficient (NTC).) Helaas is het gedrag van een NTC niet lineair. Een veel gebruikte benadering wordt geparameteriseerd als volgt:

$$R_{\text{NTC}}(T) = R_{\text{ref}} \exp\left(A + B/T + C/T^2 + D/T^3 + \dots\right), \quad (1)$$

waarbij T de temperatuur in Kelvin is, R_{ref} een referentieweerstand en A, B, C, D constanten zijn. Vaak wordt voor de referentieweerstand R_{ref} de weerstandswaarde van de NTC bij de temperatuur van 25°C genomen. (In deze opgaven gaan we deze formule niet verder gebruiken.) Je krijgt van de labdocent een NTC uitgereikt.

Een methode om het niet-lineaire gedrag van een NTC te compenseren is het plaatsen een weerstand R_p parallel aan $R_{\text{NTC}}(T)$. Deze methode is toegepast in [schakeling 1](#).

Om een variërende weerstand te meten, zijn bridge-circuits handig omdat deze de uitgangsspanning geven in termen van een verhouding van de variërende weerstand over een referentie weerstand. Een standaard bridge-circuit met één variërend element, veroorzaakt zelf ook weer niet-lineaire effecten. Met een opamp kan een bridge-circuit met één variërende weerstand zelf gelineariseerd worden.

Leerdoelen

- Met behulp van berekening een eenvoudige temperatuursensor kunnen ontwerpen
- Methodes ter beschikking hebben om niet-lineaire systemen zo veel mogelijk lineair te maken
- Simuleren en bouwen van een eenvoudig sensorensysteem

Opdrachten

Om de niet-lineariteit van een NTC te karakteriseren gebruiken we het volgende: Ten eerste benoemen we de weerstandswaarden van de NTC bij de laagste T_L , de hoogste T_H en de gemiddelde temperatuur $T_M = (T_L + T_H)/2$:

$$R_L = R_{\text{NTC}}(T_L), \quad R_H = R_{\text{NTC}}(T_H), \quad R_M = R_{\text{NTC}}(T_M). \quad (2)$$

Hiermee kunnen we een maat voor niet-lineariteit van de NTC definiëren door:

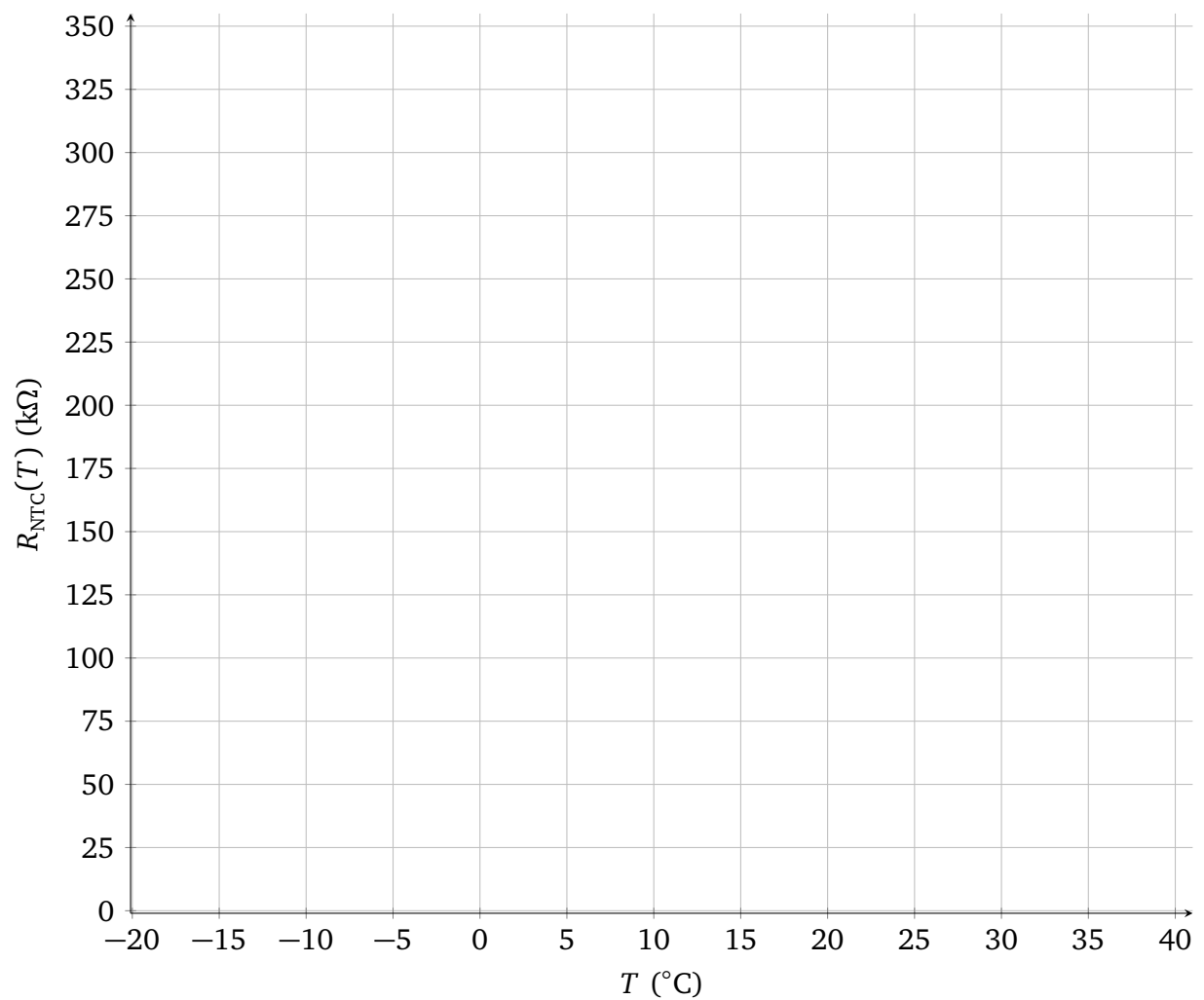
$$\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}} = \frac{R_L + R_H}{2} - R_M. \quad (3)$$

Opdracht 1: Eigenschappen van een NTC

- Vul de tweede kolom van [tabel 1](#) in op basis van de datasheet van de bovengenoemde NTC.
- Maak in [figuur 1](#) een grafiek waarin $R_{\text{NTC}}(T)$ tegen T uitgezet wordt voor temperaturen tussen $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}$ en trek een gladde curve door de aangegeven punten.
- Hoe zou het gedrag van de weerstandswaarde $R_{\text{NTC}}(T)$ van de NTC eruit hebben gezien als deze wel lineair geweest zou zijn?
- Laat zien dat als $R_{\text{NTC}}(T)$ wel lineair zou zijn, dan is $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}} = 0$ volgens vergelijking (3). Leg hiermee uit waarom $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}}$ een maat is voor niet-lineariteit.
- Is $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}}$ een perfecte maat voor niet-lineariteit? (*Hint: Kun je een niet-lineaire functie $R_{\text{NTC}}(T)$ bedenken waarvoor $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}}$ toch nul is?*)

- f) Neem $T_L = -20^\circ\text{C}$ en $T_H = 40^\circ\text{C}$. Bepaal $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}}$ voor de bovengenoemde NTC. Wat zegt dit over de niet-lineariteit van deze NTC?
- g) Teken in de grafiek van [figuur 1](#) de rechte lijn door de punten (T_L, R_L) en (T_H, R_H) . Teken ook het punt $(T_M, (R_L + R_H)/2)$. Ligt dit punt op deze rechte lijn?
- h) Teken ook het punt (T_M, R_M) . En geef aan hoe we $\Delta R_{\text{NTC}}^{\text{Niet Lin}}$ grafisch kunnen weergeven in [figuur 1](#).
- i) Meet de temperatuur en de weerstandswaarde van jullie NTC. Controleer of de gevonden waarden consistent zijn met de gegevens in [tabel 1](#).
- j) Controleer of de weerstand van de NTC daadwerkelijk verandert als de temperatuur van de NTC veranderd wordt (door bijvoorbeeld de NTC tussen je vingers te houden).

Conclusie 1



Figuur 1: Temperatuursafhankelijkheid $R_{\text{NTC}}(T)$ van een NTC

Om het niet-lineaire gedrag van de NTC te verminderen zetten we een weerstand R_p parallel aan de NTC en definiëren:

$$R_{\text{PAR}}(T) = R_{\text{NTC}}(T) \parallel R_p. \quad (4)$$

De optimale keuze van de weerstand R_p blijkt gegeven te zijn door:

$$R_p = \frac{R_M(R_L + R_H) - 2R_LR_H}{R_L + R_H - 2R_M}. \quad (5)$$

Opdracht 2: NTC met een shuntweerstand

- a) We kunnen voor $R_{\text{PAR}}(T)$ dezelfde maat voor niet-lineariteit nemen als voor $R_{\text{NTC}}(T)$ zelf:

$$\Delta R_{\text{PAR}}^{\text{Niet Lin}} = \frac{R_{\text{PAR}}(T_L) + R_{\text{PAR}}(T_H)}{2} - R_{\text{PAR}}(T_M). \quad (6)$$

Leid af dat $\Delta R_{\text{PAR}}^{\text{Niet Lin}}$ gelijk aan nul is, als R_p gekozen wordt volgens (5). (Hint: Stel $\Delta R_{\text{PAR}}^{\text{Niet Lin}} = 0$ en los op naar R_p .)

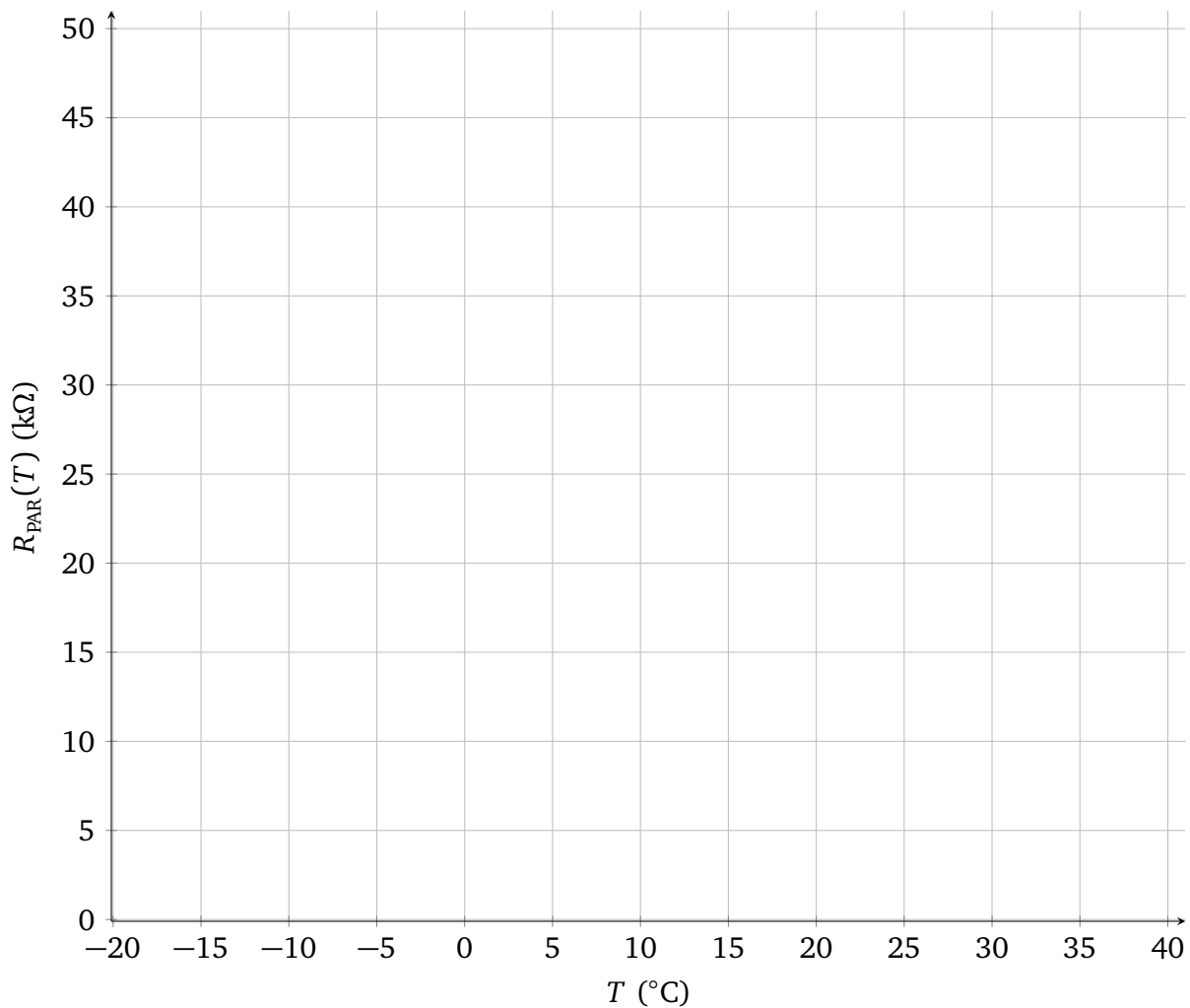
- b) Bereken in dat geval de numerieke waarde van R_p . Bepaal daarmee waarden van $R_{\text{PAR}}(T)$ voor de verschillende temperaturen geven in [tabel 1](#) en vul deze waarden in de derde kolom van deze tabel in.
- c) Geef deze waarden ook weer in een nieuwe grafiek ([figuur 2](#)) en verbind de punten weer met een gladde curve. Teken hierin ook de rechte lijn door $(T_L, R_{\text{PAR}}(T_L))$ en $(T_H, R_{\text{PAR}}(T_H))$. Wat valt je op?
- d) De lineaire benadering rond T_M van $R_{\text{PAR}}(T)$ kan dan geschreven worden als:

$$R_{\text{PAR}}(T) = R_{\text{PAR}} * (1 + K_{\text{PAR}} \Delta T), \quad \Delta T = T - T_M, \quad (7)$$

met twee constanten R_{PAR} en K_{PAR} .

Bepaal deze parameters R_{PAR} en K_{PAR} als algemene formules en hun numerieke waarden in ons specifieke geval.

Conclusie 2



Figuur 2: Temperatuursafhankelijkheid $R_{\text{PAR}}(T)$ van een NTC met een shuntweerstand

Opdracht 3: NTC in een gelineariseerde bridge-schakeling

- Hoe dienen de weerstanden R in het gelineariseerde bridge-circuit in [schakeling 1](#) gekozen te worden zodanig dat de uitgangsspanning 0 is als $T = T_M$?
- Leid af dat de uitgangsspanning gegeven is door:

$$V_{\text{out}} = -\frac{1}{2} V_{\text{REF}} K_{\text{PAR}} \Delta T. \quad (8)$$

Hoe bepaal je hieruit de temperatuur T gegeven een uitgangsspanning V_{out} .

- Vul de waarde van de uitgangsspanning V_{out} bij de verschillende temperaturen in de vierde kolom van [tabel 1](#).
- Maak een simulatie van [schakeling 1](#). Verifiëer daarmee in het bijzonder dat voor $T = T_M$ de uitgangsspanning nul is. Maak plot van V_{out} tegen T over het volledige beoogde bereik $T_L \leq T \leq T_H$. Controleer hiermee je handberekeningen.
- Bouw de schakeling op. Houd hierbij rekening:

- De voedingsspanningen van de op-amps zijn $+10\text{ V}$ en -10 V ; de referentiespanning is $V_{REF} = 5\text{ V}$ met een RC-filter en buffer om deze spanning te stabiliseren.
- Zorg ervoor dat de drie weerstanden R in de brugschakeling zoveel mogelijk gelijk zijn. (Controleer dit door expliciet de weerstandswaarden na te meten en eventueel bij te stellen.)

Conclusie 3

Tabel 1: NTC-weerstandswaarde tussen temperaturen van $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}$

$T\ (^{\circ}\text{C})$	$R_{\text{NTC}}(T)\ (\text{k}\Omega)$	$R_{\text{PAR}}(T)\ (\text{k}\Omega)$	$V_{\text{out}}\ (\text{mV})$
-20			
-15			
-10			
-5			
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			

Opdracht 4: Temperatuursmetingen met de gelineariseerde bridge-NTC-schakeling

- a) Meet de uitgangsspanning van de schakeling en bepaal hieruit de omgevingstemperatuur.

- b) Controleer deze meting door middel van een onafhankelijke temperatuursmeting.
- c) Voer voor verschillende temperaturen temperatuursmetingen uit met behulp van de gelineariseerde bridge-NTC-schakeling en de onafhankelijke temperatuursmeter.
- d) Vul hiermee [tabel 2](#) in. Hierbij zijn T_{direct} de temperatuur volgens de onafhankelijke temperatuursmeter, $V_{\text{out, gemeten}}$ de gemeten spanning bij de uitgang van de lineaire brug-NTC-schakeling, en $T_{\text{NTC-schakeling}}$ de daaruit bepaalde temperatuur.
- e) Leg hiermee uit hoe goed je de temperatuursmetingen over het bereik van -20°C tot 40°C kunt verifiëren. Hoe zou je dit kunnen verbeteren?

Conclusie 4

Tabel 2: Vergelijking temperatuursmetingen over het beoogde meetbereik van -20°C tot 40°C

$T_{\text{direct}} (^{\circ}\text{C})$	$V_{\text{out, gemeten}} (\text{mV})$	$T_{\text{NTC-schakeling}} (^{\circ}\text{C})$

Controle: controleer of je overal alle gegevens goed opgeschreven hebt. Zijn alle grafieken en tabellen volledig ingevuld? Heb je alle simulaties opgeslagen en foto's/filmpjes gemaakt van alle opgebouwde schakelingen en uitgevoerde metingen? En heb je zinvolle conclusies opgeschreven en deze goed onderbouwd?