

Systeemontwerp

Niek Louwerse 500867102
Jochem Giesbers 500855098
Stijn Thoolen 500879500

4 november 2024

Inhoudsopgave

1	Applicatie beschrijving	4
2	Theoretisch kader	4
3	Specificaties	5
4	Systeem niveau	6
5	Blokschema niveau	10
5.1	Temperatuur sensor	10
5.2	Signaal bewerking	10
5.3	Relatieve luchtvochtigheid sensor	11
5.4	Zend module	11
5.5	Energie verdeling	11
5.6	flowchart	12
5.7	Vereenvoudigen van blokschema	13
6	Circuitniveau	15
6.1	Temperatuur sensor	15
6.2	Signaal versterking	17
6.3	ADC	17
6.4	Digitale bewerking	18
6.5	DAC	18
6.6	Zender	18
7	Componentenniveau	19
7.1	Temperatuur sensor	19
7.1.1	Ruis berekening van de Stroombron	21
7.2	Luchtvochtigheid sensor	23
7.3	Digitale bewerking	23
7.4	Instrumentatie versterker	23
7.4.1	Ruis berekeningen van de Instrumentatie versterker	26
7.5	Anti aliasing filter	27
7.6	Zender	29
8	Validatie en kalibratie	30
9	EMC	31

10 Bijlage	34
10.1 Ruis berekeningen voor de temperatuur sensor	34
10.2 Ruis berekeningen voor de Stroombron	38
List of Figuren	40
List of Tabellen	40

1 Applicatie beschrijving

Voor het vak Systeemontwerp is het doel om energie zuinig elektronica te ontwikkelen. Dit willen doen door het maken van een sensor die de absolute en relatieve luchtvochtigheid, evenals de temperatuur, kan meten in een ruimte. Dit systeem is bedoeld om de temperatuur en luchtvochtigheid in kantoorpanden in kaart te brengen, zodat de werkomgeving geoptimaliseerd kan worden. Hierdoor kan efficiënter gebruik worden gemaakt van de airconditioning- en ventilatiesystemen. Om dit te bereiken maken we gebruik van twee sensoren: een temperatuursensor en een luchtvochtigheidssensor.

2 Theoretisch kader

Volgens de arbo is de maximaal Temperatuur in kantoor waar licht fysiek werk wordt verricht 28 °C [1]. voor zwaar fysiek werk is dit zelfs strenger en mag de maximale temperatuur niet boven de 23 °C uitkomen. Dit zijn wettelijke grenswaarden maar eerder een indicatie. Om ervoor te zorgen dat de sensor boven dit bereik ook nog blijft werken is een marge van besloten om marge van 17 °C aan te houden. Dit resulteert in een maximale meet temperatuur van 55 °C. In de Arbo staat geen minimale temperatuur voor een kantoor ruimte. Hierdoor is er besloten om de sensor te laten met tot -5 °C. Dit zorgt voor een meet bereik van 60 °C. Voor dit meetbereik is besloten om een temperatuur accurate van 0.1 °C. Dit gedaan om de airconditioning- en ventilatiesystemen zo accurate mogelijk informatie te geven en hiermee efficiënter de kantoorruimte te reguleren qua temperatuur

De Beste werk omstandigheden voor een werknemer op kantoor liggen rond de 22 °C [2]. Dit is in samen hang met een relatieve luchtvochtigheid van 50 procent. Om dit goed in kaart te brengen is een relatieve luchtvochtigheidssensor nodig met een resolutie van 0 tot 100 procent. Omdat de productiviteit van werknemers af neemt bij een te hoge temperatuur of luchtvochtigheid. Om ervoor te zorgen dat werknemers het beste kunnen presteren en een prettige werkomgeving hebben is het nodig om dit in kaart te brengen voor elke werkplek afzonderlijk. Hierdoor is het mogelijk om een kaart van de werkomgeving van alle werknemers te maken. Door deze informatie te verwerken en hiermee de airconditioning- en ventilatiesystemen nauwkeurig aan te sturen is het mogelijk om de werknemers op hun hoogste productiviteit te houden.

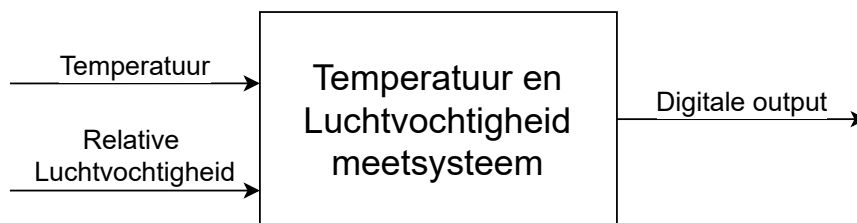
3 Specificaties

De applicatie die ontworpen wordt aan de volgende Specificatie gesteld.

- **De modules die informatie over omgeving halen mogen niet meer dan 10 mW gemiddeld verbruiken.** Deze eis komt vanuit de opdrachtgever.
- **De applicatie meet de temperatuur met een nauwkeurigheid van ± 0.1 °C in een meetbereik van -5 tot 55 graden °C.** Om accuraat de temperatuur van een kantoor ruimte in kaart te brengen wordt er gekozen voor deze parameters. De nauwkeurigheid en meetbereik is bepaald door de bronnen uit 2.
- **De applicatie meet de relatieve luchtvochtigheid met een nauwkeurigheid van ± 2 % in een meetbereik van 0 tot 100 %.** Om accuraat de relatieve luchtvochtigheid van een kantoor ruimte in kaart te brengen wordt er gekozen voor deze parameters. De nauwkeurigheid en meetbereik is bepaald door de bronnen uit 2.
- **De applicatie berekent de absolute luchtvochtigheid met een nauwkeurigheid van ± 0.02 g/kg.** Door het gebruik van de twee soorten sensoren is het mogelijk om de absolute luchtvochtigheid te berekenen.
- **De applicatie kan data versturen over een minimale afstand van 20 meter draadloos.** De minimale kantoor ruimte is per persoon vast door de NEN1824 [3]. Om hiermee rekening te houden het aantal kantoor ruimte per verdieping is het nodig om de minimale zend afstand vast te stellen op 20 meter zodat het systeem in meeste kantoor ruimte gebruikt kan worden.
- **De applicatie zal uit een minimum van twee nodes bestaan die draadloos met elkaar communiceren.** Deze eis komt vanuit de opdrachtgever.
- **De applicatie zal minimaal één meeting elke tien seconden doen.** Om ervoor te zorgen dat het ventilatie / airco-systeem genoeg informatie heeft om zichzelf bij te regelen. Is het nodig om minimaal één meeting te doen elke tien seconden. En deze dan draadloos te versturen naar het basisstation.

4 Systeem niveau

De applicatie wordt gerepresenteerd als een black box. Dit is weergegeven in Figuur 1 met de specificatie weergegeven in Tabel 1.

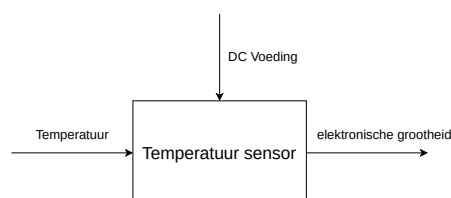


Figuur 1: Systeem ontwerp

Tabel 1: Specificaties op systeemontwerpniveau.

Module	Temperatuur en Luchtvochtigheid meetsysteem
Ingangen	Temperatuur: -5 - 55 °C met 0,1 °C nauwkeurigheid Relatieve luchtvochtigheid: 0,1 - 100 % met 2 % nauwkeurigheid
Digitale uitgang(en)	Temperatuur: in bits Relatieve luchtvochtigheid: in bits Absolute luchtvochtigheid: in bits
Functie	Berekent de relatieve luchtvochtigheid. De informatie moet draadloos verstuurd worden naar het basisstation. Het meetsysteem moet vanuit batterijen gevoed worden.

Uit dit black box schema ontstaan de volgende subsystemen. Het eerste subsysteem is de temperatuur sensor die de temperatuur meet uit de omgeving. En dit omzetten naar een elektronische grootheid zoals is weergegeven in Figuur 2 en Tabel 2. Dit subsysteem is niet mogelijk om uit te zetten, omdat anders de metingen inaccuraat worden.

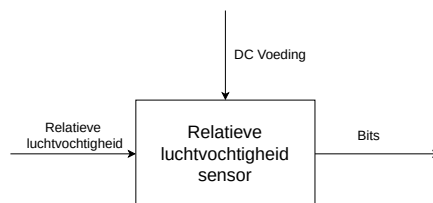


Figuur 2: Temperatuur sensor subsysteem.

Tabel 2: Specificaties van Temperatuur sensor subsysteem

Module	Temperatuur Sensor
Ingangen	Temperatuur: -5 - 55 °C met 0,1 °C nauwkeurigheid DC-voeding
Uitgang(en)	Temperatuur sensor uitgang: ? elektronische grootheid
Functie	Meet de Temperatuur in de omgeving en vormt dit om naar een elektronische grootheid.

Het tweede subsysteem is de relatieve luchtvochtigheid sensor. Dit subsysteem zet de relatieve luchtvochtigheid uit de omgeving om naar een binaire waarde. Deze waarde kan dan met een data protocol uitgelezen worden. Deze informatie moet dan door een digitaal systeem verwerkt worden, zodat het door de volgende subsystemen in het systeem gebruikt kan worden. Doordat dit subsysteem digitaal werkt, is het mogelijk om het systeem in rust stand of zelfs uit te zetten. Dit kan ervoor zorgen dat de energie van het subsysteem naar beneden gaat en er door andere subsystemen meer vermogen gebruikt kan worden. Het subsysteem is weergegeven in Figuur 3 en Tabel 3.



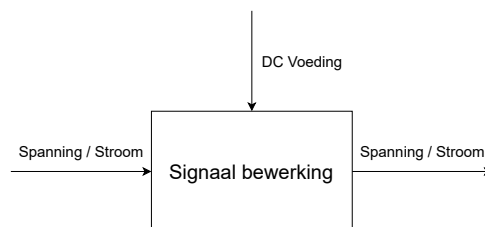
Figuur 3: Relatieve luchtvochtigheid subsysteem.

Tabel 3: Specificaties van Relatieve luchtvochtigheid sensor subsysteem

Module	Relatieve luchtvochtigheid Sensor
Ingangen	Relatieve luchtvochtigheid: 0,1 - 100 % met 2 % nauwkeurigheid DC-voeding
Uitgang(en)	Relatieve luchtvochtigheid sensor uitgang: Bits
Functie	Meet de Relatieve luchtvochtigheid in de omgeving en vormt dit om naar een binaire waarde.

Het derde subsysteem is het signaal bewerking systeem. Dit subsysteem is nodig om de output van de sensoren verder te verwerken naar informatie die gebruikt kan worden door andere subsystemen. Dit systeem kan uitgezet worden als er geen metingen

gedaan hoeven te worden. Dit wordt met het belang van energie besparing gedaan. Dit subsysteem is weergegeven in Figuur 4 en Tabel 4.

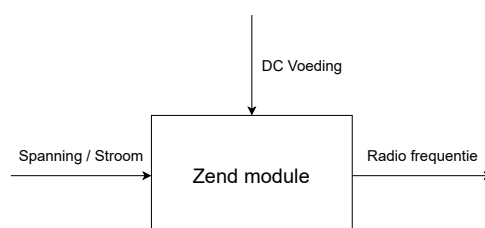


Figuur 4: Signaal bewerking subsysteem.

Tabel 4: Specificaties van Signaal bewerking subsysteem

Module	Signaal bewerking
Ingangen	elektronische grootheid: ? DC-voeding
Uitgang(en)	Spanning / Stroom ?
Functie	Bewerkt hetingangssignaal van het subsysteem waar dit op is aangesloten en geeft dit op de uitgang bewerkt terug. De bewerking kan in het digitale of analoge domein gebeuren.

Het vierde subsysteem is het Zend module subsysteem. Dit subsysteem is nodig om de informatie draadloos te versturen naar het basisstation waar alle informatie verzameld wordt. Om energie te besparen en niet constant data te versturen is het nodig dat dit subsysteem uitgezet kan worden. Dit is subsysteem is weergegeven in Figuur 5 en Tabel 5.

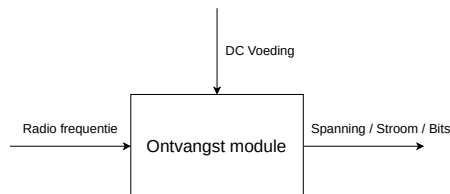


Figuur 5: Zend module subsysteem.

Tabel 5: Specificaties van Signaal bewerking subsysteem

Module	Zend module
Ingangen	Spanning / Stroom ? DC-voeding
Uitgang(en)	Radio Frequentie waar de informatie over zonden wordt
Functie	Het ingangssignaal wordt omgezet naar een RF-signaal dit wordt gedaan om de informatie draadloos te versturen.

Het vijfde subsysteem is de ontvangst module. Dit subsysteem is nodig om de informatie van de zendmodule te ontvangen en te kunnen omvormen naar informatie die het basisstation kan begrijpen. Dit subsysteem is weergegeven in Figuur 6 en Tabel 6.



Figuur 6: Ontvangst module subsysteem.

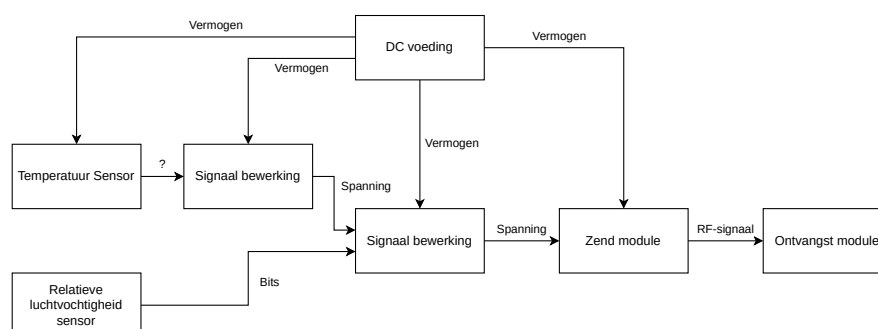
Tabel 6: Specificaties van Signaal bewerking subsysteem

Module	Ontvangst module
Ingangen	RF-signaal DC-voeding
Uitgang(en)	Spanning / Stroom / Bits ?
Functie	De RF-signalen op de ingang worden omgevormd naar een signaal wat het basis station kan begrijpen

Met deze vijf subsystemen is het mogelijk om ons systeem te ontwerpen. Elke van deze subsystemen heeft zijn eigen rol en kan meerdere keren voorkomen in het product.

5 Blokschema niveau

Met de subsystemen kan nu een blokschema ontworpen worden. Dit blokschema is weergegeven in Figuur 7. Dit blokschema bestaat uit zeven subsystemen die elke verder uitgewerkt kunnen worden. Doordat meerdere blokken van het blokschema uitgezet of in een laag verbruik stand geplaatst kunnen worden zullen deze blokken minder vermogen verbruiken.



Figuur 7: Blokschema opgebouwd uit alle subsystemen.

5.1 Temperatuur sensor

Zoals is beschreven in paragraaf 4: Systeem niveau, is het niet mogelijk om de sensor uit te kunnen schakelen. Hierdoor is het nodig dat er goed nagedacht wordt over hoe de temperatuur sensor zo energie zuinig mogelijk ontworpen wordt. Het type sensor en de aansturing daarvan spelen een grote rol hierin. Dit wordt allemaal beschreven in paragraaf 6: Circuit niveau. Daarom is er besloten dat de Temperatuur sensor maximaal 1 mW mag verbruiken. Daarnaast moet de Temperatuur Sensor een minimale SNR hebben van 60 dB. Dit is zodat de informatie van de sensor niet verdwijnt in de ruis.

5.2 Signaal bewerking

De uitgang van de temperatuur sensor kan niet direct uitgelezen worden door het digitale signaalbewerkingsblok. Hiervoor moet eerst het signaal versterkt worden door een Signaal bewerkingsblok. De versterking hangt af van de signalen die het digitale Signaal bewerkingsblok kan verwerken. Om de applicatie energie zuinig te houden mag dit Signaal bewerkingsblok 1 mW gebruiken om ervoor te zorgen dat de zend module zoveel mogelijk heeft om informatie goed te verzenden. Om dit te bereiken is misschien nodig om dit blok uit en aan te kunnen schakelen. Hierom moet er rekening mee gehouden in de verdere ontwerp stappen.

Het tweede Signaal bewerkingsblok heeft twee inputs. Deze inputs worden gebruikt om de absolute luchtvochtigheid te berekenen. Om dit efficiënt te doen vindt deze berekening plaats in het digitale domein. Deze informatie wordt dan omgevormd naar een analoog signaal om de zendmodule mee aan te sturen. Om de energie verbruik te bepalen wordt er rekening gehouden met een verbruik van 2 mW.

5.3 Relatieve luchtvochtigheid sensor

Zoals is beschreven in paragraaf 4: Systeem niveau, is dit een blok met een digitale uitgang. Dit zorgt ervoor dat er in applicatie een digitale chip moet zijn om de informatie van de Relatieve luchtvochtigheid Sensor uit te lezen en te kunnen verwerken. Het verbruik en nauwkeurigheid zijn de belangrijkste eigenschappen voor de sensor keuze.

5.4 Zend module

Het zendmodule blok verwerkt de signalen die hij binnen krijgt naar een RF-signaal. Dit RF-signaal wordt via een antenne verstuurd naar de Ontvangst module. De frequentie waarop de zendmodule zijn informatie verstuurd zal gebeuren op een openbare band [4]. Dit zorgt ervoor dat er geen zendlicentie nodig is om de applicatie te gebruiken. De energie verbruik van de applicatie mag niet boven de 10 mW uit komen. Om dit te voorkomen wordt gedoeld op een energie verbruik van 5 mW voor het zend module blok.

5.5 Energie verdeling

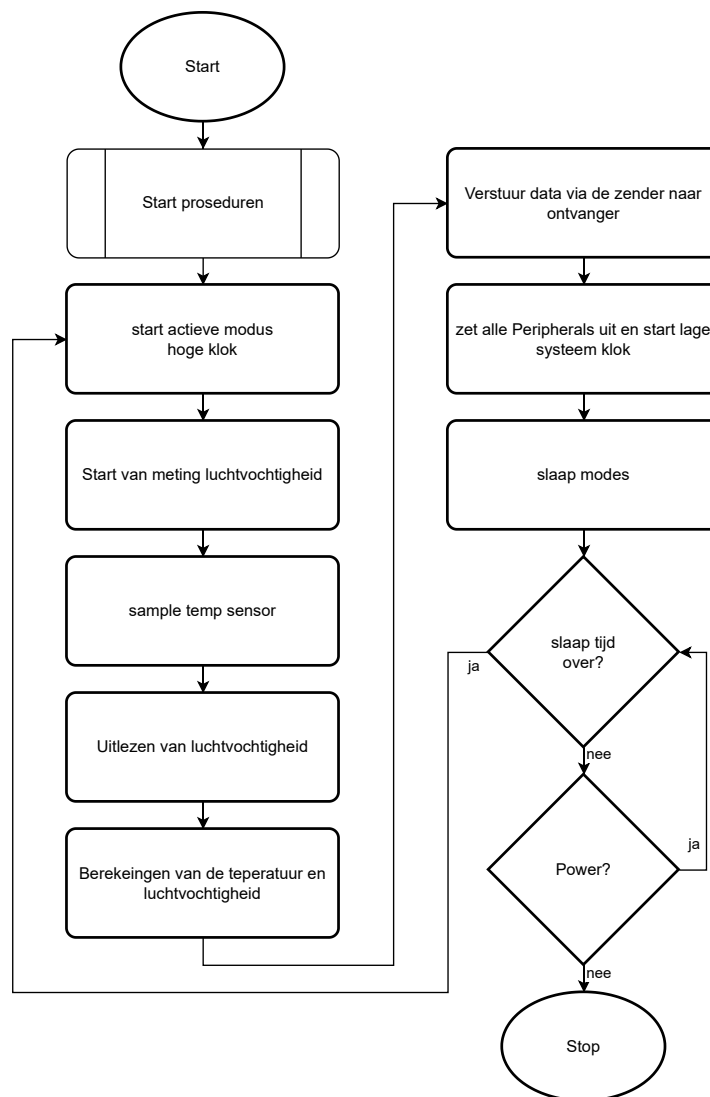
Het vermogen is nu als volgt, verdeelt onder de Blokken van het blokschema. Dit is zichtbaar in Tabel 7.

Blokken	Energie verbruik
Temperatuur sensor	1 mW
Signaal bewerking	1 mW
Digitale signaal bewerking	2 mW
Relatieve luchtvochtigheid sensor	100 μ W
Zend module	5 mW
totaal	9,1 mW

Tabel 7: Vermogens verdeling van de applicatie op blokschema niveau.

5.6 flowchart

Om de programmastructuur voor de digitale verwerking inzichtelijk te maken en om het systeem zo efficiënt mogelijk te ontwerpen is een flow chart gemaakt, te zien in Figuur 8.



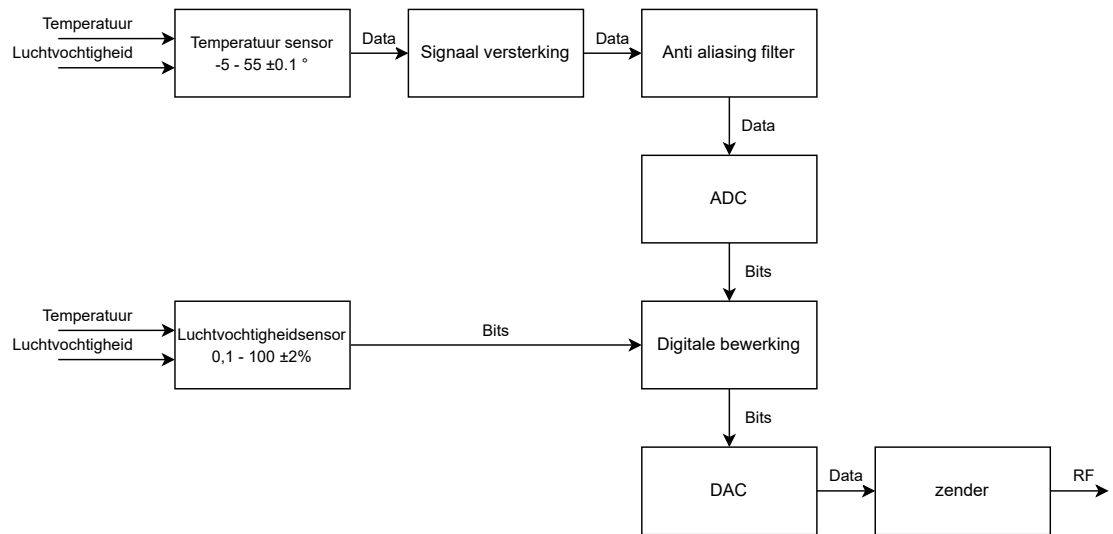
Figuur 8: Flow chart digitale signaal bewerking.

Tijdens de start procedure zullen de digitale systemen correct ingesteld worden voor het doen van de metingen, en zullen eventueel overbodige systemen uitgeschakeld worden om energie te besparen. Omdat er slechts elke 10 seconde een meting gedaan hoeft te

worden zal het systeem het grootste deel van de tijd in slaap modus kunnen zijn. Dat wil zeggen alle systemen uit staan en alleen een systeem om weer in actieve modus te komen nog aan zal blijven staan. Tijdens de actieve modes zal de systeemklok hoog zijn, het verbruik van het digitale systeem heeft namelijk een lineair verband met de kloksnelheid. Om de andere subsystemen zoals de zender zo kort mogelijk aan te hebben, en het verbruik van deze systemen zo laag mogelijk te houden moet de actieve modes zo kort mogelijk zijn. Door een hoge kloksnelheid te kiezen neemt het totale gebruikte vermogen van het digitale systeem niet of nauwelijks toe, maar kan de verwerking van de sensor gegevens wel sneller gedaan worden en hoeven deze systemen minder lang aan te staan waardoor deze systemen zuiniger zijn. Het is wel van belang om de tijd in active modes zo efficiënt mogelijk te gebruiken, dat wil zeggen zo min mogelijk wachten, want wachten betekent klokslagen die niet nodig zijn en verspilde energie. Het beperken van wachten wordt bijvoorbeeld gedaan door de luchtvochtigheidssensor een meting te laten starten en daarna alvast de temperatuur sensor uit te lezen, zodat hierna de resultaten van de luchtvochtigheidssensor klaarstaan en hier niet op gewacht hoeft te worden. Zodra de gegevens verzameld zijn zal de zender aangezet worden en worden de gegevens verstuurd, vervolgens zullen alle systemen weer uitgeschakeld of in slaap modus gezet worden om te wachten tot de volgende meting gedaan moet worden.

5.7 Vereenvoudigen van blokschema

Het blokschema wat ontworpen is uit de subsystemen is nog niet ver genoeg opgedeeld. Dit zorgt ervoor dat er nieuwe blok schema ontworpen moet worden wat gebaseerd is op het eerste schema, maar dan uit meer basis functies bestaat om het ontwerpen van het circuit in Paragraaf 6: Circuit Niveau makkelijker en duidelijker te maken. Dit blok schema is weergegeven in Figuur 9. Het blok ADC is de analoog naar digitaal conversie waarin gezorgd wordt dat het analoog signaal verder bewerkt kan worden door de digitale bewerking. Daarnaast is er het blok DAC waarin de conversie van digitaal naar analoog in plaats vindt, zodat de zender het signaal kan begrijpen.



Figuur 9: Blokschema opgebouwd uit meer basis functies.

6 Circuitniveau

Voor het ontwikkelen van de applicatie is het nodig om de blokken uit het vereenvoudigde blokschema uit te gaan werken. Dit process wordt besproken in dit hoofdstuk. Als eerste wordt er gekeken naar de Temperatuur sensor.

6.1 Temperatuur sensor

Voor het meten van Temperatuur zijn er verschillende typen soorten op de markt. Om de correcte keuze te maken is het nodig om dit te vergelijken. In Figuur 10 zijn de verschillende typen sensoren weergegeven die veel in de industriële sector gebruikt wordt.

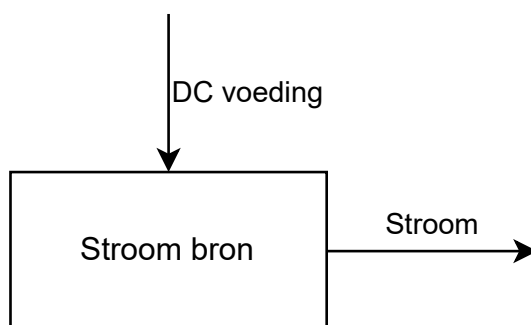
	Thermocouple	Platinum Resistance	Thermistor
Sensor	Thermoelement, two dissimilar metals/alloys	Platinum-wire wound or flat-film resistor	Ceramic (metal oxides)
Accuracy (typical values)	0.5 to 5.0°C	0.1 to 1.0°C	0.1 to 1.5°C
Long term Stability	Variable, Prone to ageing	Excellent	Good
Temperature range	-200 to 1750°C	-200 to 650°C	-100 to 300°C
Thermal response	Sheathed – slow Exposed tip – fast 0.1 to 10 secs typical	Wirewound – slow Film – faster 1-50 secs typical	generally fast 0.05 to 2.5 secs typical
Excitation	None	Constant current required	None
Characteristic	Thermovoltage	PTC resistance	NTC resistance (some are PTC)
Linearity	Most types non-linear	Fairly linear	Exponential
Lead resistance effect	Short cable runs satisfactory	3 & 4 wire – low. 2 wire – high	Low
Electrical “pick-up”	susceptible	Rarely susceptible	Not susceptible
Interface	Potentiometric input. Cold junction compensation required	Bridge 2,3 or 4 wire	2 wire resistance
Vibration effects/ shock	Mineral insulated types suitable	wirewound – not suitable. Film – good	Suitable
Output/ characteristic	From 10µV/°C to 40µV/°C depending on type	approx. 0.4 W/°C	-4% / °C
Extension Leads	Compensating cable	Copper	Copper
Cost	Relatively low cost	Wirewound – more expensive Film – cheaper	Inexpensive to moderate

Figuur 10: Verschillende type temperatuur sensoren [5].

De specificaties hebben een nauwkeurigheid van 0.1 °C opgesteld. Hierdoor is het niet mogelijk om een Thermokoppel te gebruiken. De andere twee optie halen wel de gespecificeerde temperatuur nauwkeurigheid van 0.1 °C. Naast deze twee optie is er ook nog de optie van het zelf ontwikkelen van de sensor. Dit kan gedaan worden

door middel van Titanium draad. Hierdoor zou zelfs een beter nauwkeurigheid van 0.1 °C sensor ontwikkeld worden. Het probleem hiermee is de prijs van Titanium draad. De prijs van het maken van de eigen sensor zal buiten het budget van dit vak liggen. Hierdoor is er niet gekozen voor deze keuze. De keuze die er nu nog zijn de platina-weerstand en Thermistor. De reactie tijd van de Thermistor is lager dan die van de platina-weerstand. Beide hebben een reactie tijd die binnen de eisen van de applicatie vallen. Hierom wordt er gekeken naar andere kwaliteiten van het type sensoren. Als er gekeken wordt naar de lineariteit van de sensor is te zien dat de Thermistor een exponentiële lineariteit heeft. Terwijl de platina-weerstand een redelijke lineaire uitgang heeft in vergelijking tot de temperatuur verandering. Hierdoor is het mogelijk om met de platina-weerstand een eenvoudiger Signaal versterking systeem te ontwikkelen. Hierdoor is er gekozen voor het gebruik van een platina-weerstand voor het ontwerpen van de Temperatuur sensor.

Voor het gebruiken de platina-weerstand is er alleen een constant stroom bron nodig. Deze Stroombron mag niet tot zo min mogelijk temperatuur gevoelig zijn. Om de sensor minder nauwkeurig te maken. Dit kan bereikt worden door een Stroom bron te ontwikkelen met een lage ppm. Daarnaast moet de stroombron een stroom van tientallen μA leveren, zodat het systeem zo energie zuinig blijft. Zoals is weergegeven in Figuur 11 en Tabel 8.



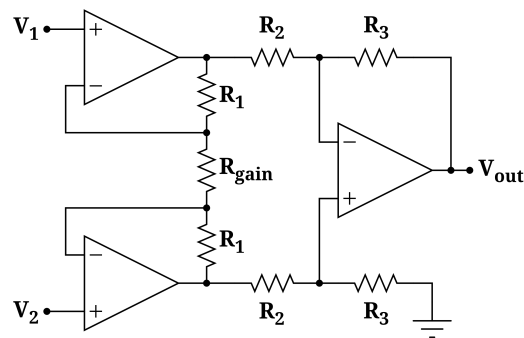
Figuur 11: Stroombron schema

Tabel 8: Specificaties van Stroombron voor de platina-weerstand

Module	Stroombron
Ingangen	DC-voeding
Uitgang(en)	Stroom in μA
Functie	Zorgt voor een constante stroom die door de platina-weerstand gaat lopen Moet een lage PPM hebben om temperatuur onafhankelijk te zijn Heeft een minimale SNR van 60 dB

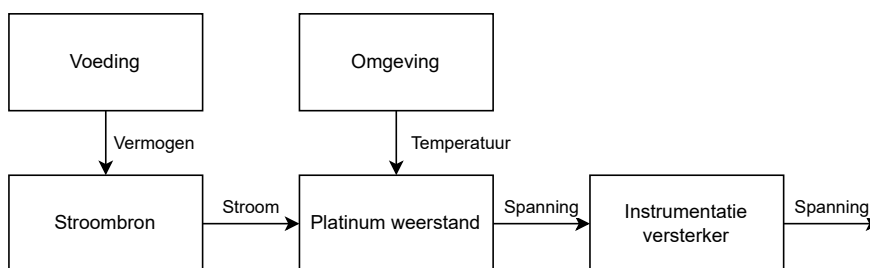
6.2 Signaal versterking

De platina-weerstand heeft door de constante stroombron een spanningsverschil over hem heen staan. Om deze spanning te versterken is er een versterker nodig die van differentieel naar single ended versterkt. Hiervoor zijn twee opamp implementatie mogelijk. De Differentiële versterker en Instrumentatie versterker. Hierin is de Instrumentatie een betere optie door hoge ingangsimpedantie en beter CMMR. Daarom is er gekozen voor een Instrumentatie versterking implementatie. De Schematische weergave van een Instrumentatie versterker is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Schematische weergave van een Instrumentatie versterker [6].

Nu de keuzes zijn gemaakt voor het type sensor en versterker is het mogelijk om een nieuw schema te maken waarin deze informatie verwerkt is. Dit schema is weergegeven in Figuur 13.



Figuur 13: De sensor en versterker blokken uitgewerkt.

6.3 ADC

Het temperatuur bereik is van -5 tot 55 graden, om een nauwkeurigheid van 0.1 te halen zijn dus $\frac{60}{0.1} = 600$ stappen nodig. Dit betekent dat er minimaal een 10 bit adc nodig is. De reactie snelheid van de gekozen sensor is 1 tot 50 seconde, dit kan

gebruikt worden om de minimale bandbreedte te bepalen. Hiervoor wordt uitgegaan van de snelste tijd 1 seconde. Uitgaande van een maximale temperatuursverandering van -5 tot 55 graden. In 1 seconde reageert de sensor met ongeveer 63% wat dus voor een maximale temperatuursverandering neerkomt op een stap van

6.4 Digitale bewerking

Digitaal communicatie protocol nodig voor het uitlezen van luchtvochtigheid.

6.5 DAC

De data zal serieel verstuurd worden. Hierdoor is een 1 bit dac nodig, en hoeft dit eigenlijk niet meer echt een dac genoemd te worden, voor de implementatie hiervan betekent dit dat waarschijnlijk een gpio pin van een microcontroller al geschikt is.

6.6 Zender

7 Componentenniveau

In het componentenniveau worden het circuitniveau omgezet naar een component keuzes en schema's van de schakelingen. Dit wordt gedaan om het ontwerp van het circuitniveau om te zetten naar implementatie.

7.1 Temperatuur sensor

In het circuitniveau is er gekozen voor een platina-weerstand. Hierin zijn er twee betaalbare varianten op de markt. De Pt1000 en Pt100. Het enige verschil is weerstandswaarde en de hoeveelheid stroom die er maximaal door de sensor mag lopen. De Pt100 heeft een weerstand van 100Ω en er mag maximaal 1,4 mA volgens de fabrikant en de Pt1000 heeft een weerstand van $1\text{ k}\Omega$ en er mag maximaal 0.4 mA volgens de fabrikant [7]. Doordat er een constante stroom door de sensor loopt, ontstaat zelfverwarming in de sensor. Dit maakt de sensor minder nauwkeurig. Om dit effect te verminderen, moet een zo laag mogelijke stroom door de sensor worden gestuurd via de stroombron. Om ervoor te zorgen dat het signaal van de sensor niet te klein wordt door de stroom te verlagen is er gekozen voor de Pt1000. Hierdoor kan de uitgangsspanning net zo hoog blijven als bij de Pt100, maar dan met 10 keer minder stroom. Dit zorgt voor een lager energie verbruik. Voor het temperatuurbereik dat voor de applicatie nodig is. Gaat de weerstandswaarde variëren tussen de 980Ω en 1194Ω [8].

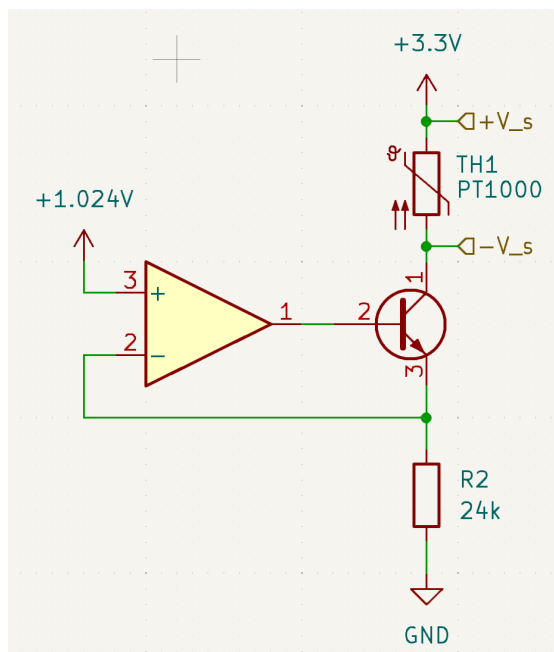
Om dit signaal te kunnen uitlezen is er een stroom bron nodig op een kleine stroom constant door de Pt1000 laat lopen. Uit het circuit niveau zijn de volgende eisen ontstaan voor de stroom bron.

- Minimale SNR van 60 dB.
- Lage PPM om temperatuur om temperatuur onafhankelijk te zijn.

Naast deze eisen van het circuit niveau is er ook nog de eis vanuit het blokschema niveau waar maximaal 1 mW gebruikt mag worden door de sensor module. De sensor zelf is een passief component en gebruikt geen vermogen, maar de systemen om de Pt1000 uit te kunnen lezen wel. Door de sensormodule (stroombron plus Pt1000) op een lage voedingsspanning te laten werken, wordt het energieverbruik verlaagd. Daarom is gekozen voor een voedingsspanning van 3,3 volt. Bij lagere spanningen zijn er weinig opties voor versterkers en microcontrollers om de data te verwerken.

Om ervoor te zorgen dat er een constante Stroom gaat lopen is er een referentie nodig waar de stroom aan gerefereerd kan worden. Deze referentie mag niet temperatuur gevoelig zijn en moet energie zuinig zijn. Uit onderzoek blijkt dat de ISL60002 serie van RENESAS voldoet aan deze eisen met een Stroom verbruik van 350 nA en

PPM van 20 [9]. Door deze spanningsreferentie met een transadmittantie versterker om te zetten naar een constante stroom ontstaat er een stabiele constante stroom die minimaal beïnvloed wordt door temperatuur verandering. Onder de voorwaarde dat de weerstand die hier voor gebruikt ook een lage ppm heeft. Dit idee is weergegeven in Figuur 14



Figuur 14: De Pt1000 met een constante Stroombron.

Door een weerstandswaarde van $24\text{k}\Omega$ te plaatsen tussen de GND en de min ingang van de opamp en de emitter van de NPN-transistor. Zorg je ervoor dat deingangsspanning door 24 duizend gedeeld wordt en er een constante stroom van $42,6\mu\text{A}$ loopt door de Pt1000. De grootste vermogensverbruiker is de opamp die gebruikt wordt in combinatie met de transistor om een nullor te creëren. Dit komt door de Quiescent stroom die een opamp minimaal nodig heeft om te kunnen functioneren. Om ervoor te zorgen dat er minder 1 mW aan vermogen verbruikt wordt door de sensor module moet er gekeken worden naar een opamp met een lage Quiescent stroom en lage maximale stroom verbruik. Met deze specificaties is er naar low power opamps gekeken. Hier kwam de LTC2055 [10] met lage stroom verbruik het beste uit. Er is nog naar de MCP6002 [11] gekeken, deze is minder zuinig, maar qua prijs goedkoper. De LTC2055 is gekozen vanwege het lagere energieverbruik en de lagere maximale stroom. Als laatste moet er een keuze worden gemaakt voor het type NPN-transistor dat gebruikt moet worden. Omdat de opamp zijn parameters richting nul gaan heeft de ruis van de Transistor weinig tot geen invloed op de schakeling en is deze daarom te verwaarlozen. Hierom is

er gekozen voor de NPN-transistor die al aanwezig was op school tijdens het project. Er is daarom gekozen voor de B547 [12] dit bespaart kosten, omdat deze transistor niet extern ingekocht hoeft te worden.

Nu de componenten zijn gekozen op basis van hun lage verbruik en prestaties, is het belangrijk om de nauwkeurigheid van deze specifieke stroombron verder te analyseren door te kijken naar de ruisbijdragen in de schakeling. De ruis in dit systeem kan de precisie van de stroombron beïnvloeden, dus bespreken we in de volgende sectie de verschillende ruisbronnen en hun kwantitatieve bijdragen. Hierbij richten we ons op de $1/f$ -ruis en witte ruis van de spanningsreferentie en opamp, evenals de thermische ruis van de weerstand.

Door deze ruisbijdragen samen te nemen, kunnen we de totale stroomruis berekenen en zo inzicht krijgen in de nauwkeurigheid van de stroombron.

7.1.1 Ruis berekening van de Stroombron

Om de nauwkeurigheid van de stroombron te kwantificeren, berekenen we hieronder de bijdragen van de verschillende ruisbronnen:

1. Ruis van de spanningsreferentie

De spanningsreferentie genereert $1/f$ -ruis, die onder een cutoff-frequentie van 10 Hz dominant is, en een constante witte ruis daarboven. De $1/f$ -ruis wordt berekend met de volgende formule:

$$U_{n,\text{ref, flicker}} = A_{\text{ref}} \cdot \ln \left(\frac{f_{\text{cutoff}}}{f_{\text{low}}} \right)$$

waarbij A_{ref} afhankelijk is van de witte ruis boven de cutoff-frequentie. De uitkomst geeft de ruis van de spanningsreferentie die de stabiliteit van de stroombron kan beïnvloeden.

2. Ruis van de opamp

De opamp heeft een vergelijkbare ruisbijdrage als de spanningsreferentie, met $1/f$ -ruis onder een cutoff-frequentie van 10 Hz en witte ruis daarboven. Op dezelfde manier wordt de $1/f$ -ruis van de opamp als volgt berekend:

$$U_{n,\text{opamp, flicker}} = A_{\text{opamp}} \cdot \ln \left(\frac{f_{\text{cutoff}}}{f_{\text{low}}} \right)$$

waarna deze spanningsruis wordt omgezet naar stroomruis om het effect op de uitgangsstroom van de stroombron in te schatten.

3. Thermische ruis van de weerstand

De thermische ruis van de weerstand wordt berekend met de formule:

$$I_{n,\text{resistor}} = \sqrt{\frac{4k_B T}{R}}$$

4. **Spanningsruis omzetten naar stroomruis** De spanningsruis van de opamp en spanningsreferentie kunnen worden omgezet naar stroomruis door de weerstand. Dit wordt berekend met de formule:

$$I_n^2 = \frac{U_n}{R^2}$$

5. Totale stroomruis

De totale stroomruis van de stroombron wordt berekend als de kwadratische som van de stroomruiscomponenten:

$$I_{n,\text{total}} = \sqrt{I_{n,\text{ref}}^2 + I_{n,\text{opamp}}^2 + I_{n,\text{resistor}}^2}$$

Dit geeft ons de uiteindelijke ruisbijdrage die de precisie van de stroombron bepaalt en de stabiliteit van het systeem beïnvloedt. Door deze formules in te vullen voor de gewenste bandbreedte van 0,1 tot 1 Hz resulteert dit in de volgende formule:

$$I_{n,\text{total}} = \sqrt{(1,9188 \cdot 10^{-9})^2 + (1,7269 \cdot 10^{-10})^2 + (8,6877 \cdot 10^{-13})^2} = 1,9266 \cdot 10^{-9} \text{ A}$$

6. **Signaal ruis verhouding** Met de berekende stroomruis is het nu mogelijk om de SNR van de stroombron te berekenen. Dit is weergegeven in de volgende formule:

$$\text{SNR} = 20 \log\left(\frac{4,26 \cdot 10^{-5}}{1,9266 \cdot 10^{-9}}\right) = 86.906 \text{ dB}$$

Nu berekend is dat de Stroombron voldoet aan de SNR-specificatie is het belangrijk om te berekenen hoeveel vermogen het systeem gaat gebruiken. Hiervoor wordt de informatie uit de datasheets gebruikt voor stroomverbruik. Dit is weergegeven in de volgende formule:

$$P_{\text{totaal}} = \alpha \cdot \frac{T}{T_{\text{actief}}} \cdot P_{\text{actief}} + (1 - \alpha \cdot \frac{T}{T_{\text{actief}}}) \cdot P_{\text{lek}}$$

Omdat er altijd een constante stroom door de Pt1000 moet lopen is er geen P_{lek} dit zorgt ervoor dat de formule versimpeld kan worden naar de volgende formule.

$$P_{\text{totaal}} = P_{\text{actief}}$$

Door deze formule in te vullen door informatie van de datasheets [9, 10] zorgt ervoor dat de geschatte vermogens verbruik rond de 0,5 mW wat is weergegeven in de volgende Formule:

$$P = 3,3 \cdot 150 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 350 \cdot 10^{-9} = 0,496 \text{ mW}$$

7.2 Luchtvochtigheid sensor

7.3 Digitale bewerking

benodigdheden zijn: i2c voor uitlezen luchtvochtigheid, adc voor uitlezen temp sensor, gpio pin voor aansturen zender, gpio pin voor aan uit schakelen zender en versterker ivm stroom verbruik. sleep modus voor verlagen stroom verbruik. attiny1624, heeft alles en weinig extra, enige extra zijn een aantal communicatie protocollen als spi en uart, maar dat is bijna altijd als er een protocol als i2c nodig is. power down modus waarbij stroomverbruik enkele μA is. daarbij draait alleen nog de RTC op de ingebouwde 32 kHz oscillator, de rest staat allemaal uit. De RTC kan gebruikt worden om uit de power down modus te komen. In de Specificaties is aangegeven dat er minimaal elke 10 seconde nieuwe data verstuurd moet worden. De RTC kan gebruikt worden om elke 8 seconde een interrupt te maken en er zo dus elke 8 seconde een meting gedaan kan worden. Voedingsspanning van 3.3 volt voor minder verbruik, goed voor 5MHz klok om zo snel mogelijk data te verwerken en te versturen en in verhouding zo lang mogelijk in de zuinige slaap modes te zijn.

7.4 Instrumentatie versterker

De stroom die door de Pt1000 loopt zorgt ervoor dat er over de Pt1000 een spanning gaat staan in de mV. Om dit signaal te kunnen verwerken in het digitale domein is het nodig om deze spanning te versterken. In het circuit niveau is bepaald dat dit gedaan moet worden door middel van een instrumentatie versterker. Het uitgangssignaal van de Pt1000 gaat variëren tussen de 41,81 en 50,94 mV. Dit zorgt voor een dynamisch bereik van 9,13 mV en een statisch signaal van 41,81 mV. Het digitale systeem een ADC van 12 bit. Dit zorgt ervoor dat er over het bereik van de ADC 4096 stappen zijn. Met deze specificatie ontstaat er een LSB van 0,805 mV. Hierdoor is het nodig dat het signaal van de Pt1000 minimaal versterkt wordt naar een signaal waar het temperatuurverschil zichtbaar is in LSB. Uit de volgende Formules komt het resultaat uit dat er een minimale versterking van 105,8 nodig is om de specificaties van de ADC te bereiken.

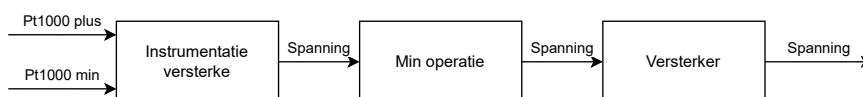
$$\frac{\frac{V_{dynamisch}}{\text{Minimale ADC stappen}}}{LSB} \cdot A = 1$$

$$\frac{\frac{9,13mV}{1200}}{0,805mV} \cdot A = 1$$

Door de formule te herschrijven zodat A geïsoleerd is resulteert dat in de volgende formule

$$A = \frac{1}{\frac{9,13mV}{1200} \cdot 0,805mV} \geq 105,8$$

Als deze versterking in één keer plaatsvindt, wordt het signaal op de uitgang van de Instrumentatie versterker 5,389 V dit gaat boven de voedingsspanning van het systeem. Hierom moet de versterking in twee trappen gedaan worden waar tussen een deel van het statische signaal weg gehaald wordt om ervoor te zorgen dat het signaal binnen de voedingsspanning blijft. Zoals is weergegeven in Figuur 15.

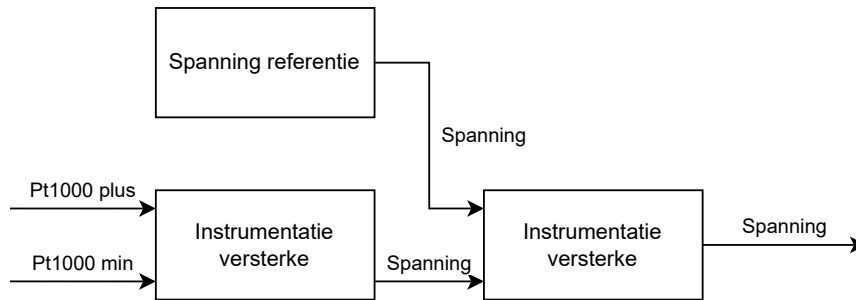


Figuur 15: Schematische weergave van de versterker implementatie.

Om de ruis van de tweede versterker en min operatie zo min mogelijk invloed te laten hebben op het SNR is het nodig dat de Instrumentatie versterker zo veel mogelijk versterkt. Een versterking van 53 keer zo hiervoor het beste uitkomen, doordat het halverwege het doel zit van de minimale versterking die nodig is om de eisen van de ADC te halen. Met daarbij zorgt een versterking van 53 keer voor een maximaal signaal van 2,69 Volt en minimaal signaal van 2,21 Volt. Deze signalen zitten binnen de voedingsspanningen. Door met de min operatie er minimaal 1,1 volt van af te halen kan daarna het signaal versterker worden met een factor 2 om de beoogde signaalgrootte te behalen.

Door een grotere spanning van het signaal af te halen met de min operator is het mogelijk om het uitgangssignaal meer in het midden van het ADC bereik te plaatsen. Dit wordt gedaan om ervoor te zorgen dat het signaal meer in het lineaire gebied van de ADC te plaatsen wat het trimmen van de informatie makkelijker maakt. Door deze reden is er gekozen voor een spanning van 2 Volt. Hierdoor komt er op de ingang van de versterker een signaal tussen de 0,21 Volt en 0,69 Volt. Dit resulteert dan in een spanning tussen de 0,42 Volt en 1,389 Volt. Dit is niet in het midden van de ADC. Om hiervoor te zorgen is het nodig om het signaal meer te versterken. Hierom is er gekozen voor een versterking van 4. Dit zorgt ervoor dat de resolutie van de ADC per 0.1 °C hoger is dan de opgestelde specificatie. Dit maakt het makkelijker om het signaal te trimmen en kalibreren.

De min operatie en versterkingstrap kan worden samengevoegd door het gebruik van een tweede Instrumentatie versterker. Dit zorgt voor versimpeling in het circuit. Dit resulteert in de volgende schema weergegeven in figuur 16.



Figuur 16: Schematische weergave van de versterker implementatie.

De keuze voor de specifieke Instrumentatie versterker implementatie bepaalt het vermogensverbruik. Uit onderzoek blijkt dat het meer vermogen kost om de Instrumentatie versterker op te bouwen met meerdere versterker in vergelijking tot IC waar de volledige Instrumentatie versterker in zit op de terugkoppelweerstand na. Voor deze reden wat er gekeken naar verschillende Instrumentatie versterker IC's. In de weergegeven Tabel worden verschillende IC vergeleken 9 met informatie uit de datasheets [13–15].

Versterker	$V_{Operating}$	$I_{Quiescent}$	V_{input}	V_{output}	V_{ruis}	I_{ruis}
AD8220	4,5 - 36	750μ	$0 - V_s - 2,2$	$0,2 - V_s - 0,2$	$14nV\sqrt{Hz}$	$1fA\sqrt{Hz}$
AD8226	2,2 - 36	425μ	$0 - V_s$	$0,1 - V_s - 0,1$	$22nV\sqrt{Hz}$	$100fA\sqrt{Hz}$
INA828	4,5 - 36	600μ	$2 - V_s - 2$	$0,15 - V_s - 0,15$	$7nV\sqrt{Hz}$	$170fA\sqrt{Hz}$

Tabel 9: Vergelijking verschillende versterkers.

Voor het voeden van deze IC wordt een andere spanning gebruikt dan de rest van het systeem. Dit wordt gedaan om deze versterkers meer overhead te geven. Hierom is gekozen voor een voedingsspanning van 5 Volt. Met deze spanning kan alle drie de optie gevoed worden. Uit de Tabel 9 en datasheet is te zien dat de INA828 niet gebruikt kan worden door het kleine ingang spanning bereik. Dit zou opgelost kunnen worden door een nog hogere voegingsspanning te nemen. Dit zorgt voor meer vermogen verbruik en is daarom ook niet voor gekozen. Dan blijven de AD8220 en AD8226 over waar de AD8226 zuiniger is ten koste van een hogere ruis. Dit komt doordat de AD8220 jfet's gebruikt aan de ingang om de ruis te beperken, dit zorgt dan weer wel voor een hogere $I_{Quiescent}$. Daarnaast heeft de AD8220 net zoals de INA828 een beperkt input bereik aan de bovenkant. Dit zorgt ook voor problemen doordat het ingangssignaal van de Instrumentatie versterker tussen de 3,3 Volt en 3,25 Volt ligt. Zoals is weergegeven in Figuur 14. Hierdoor kan de AD8220 het signaal niet goed verwerken. Zonder de voedingsspanning, wat nog een optie kan zijn als de AD8226 te veel ruis genereert.

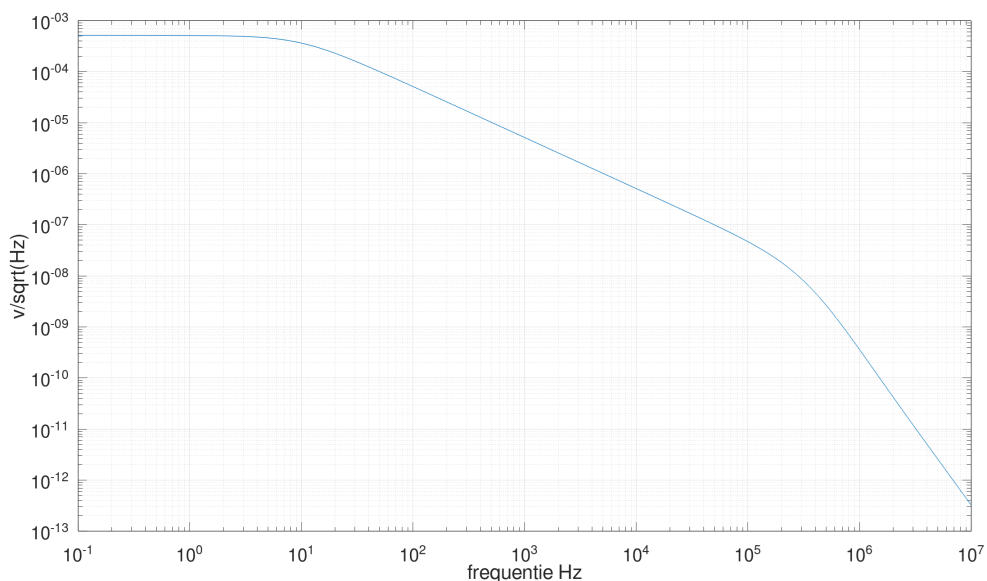
7.4.1 Ruis berekeningen van de Instrumentatie versterker

De Ruis berekeningen voor de versterker zijn gedaan in Octave hierdoor is het simpel om de twee opamp te vergelijken. De code die gebruikt voor deze berekeningen is te vinden in de bijlages 1, 2. Uit deze berekeningen blijken de volgende waarden voor SNR van beide opamps. Zoals is weergegeven in Tabel 10.

Versterker	SNR
AD8220	72,2808 dB
AD8226	72,3018 dB

Tabel 10: SNR van de twee mogelijke versterkers.

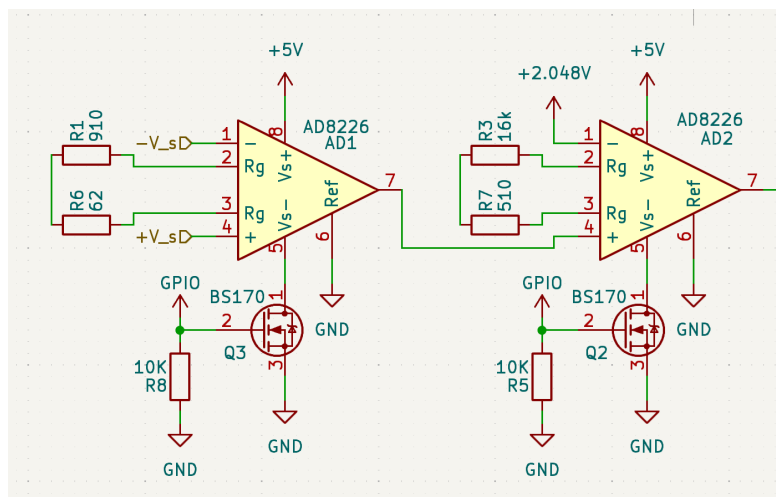
Uit de berekening blijkt dat de AD8226 zelfs beter presteert, dit komt doordat de AD8220 een hogere $1/f$ -ruis heeft. Deze ruis overheerst de ruis in het laag frequent gebied waar de Pt1000 in werkt het meeste. Vanwege deze reden is er gekozen voor de AD8226. De spectrale ruis is weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17: Spectrale ruis van de Temperatuur sensor over een frequentie bereik van 0,1 Hz tot 10 MHz.

Door het verbruik van de AD8226 van $400 \mu\text{A}$ per opamp is het nodig om de versterkers uit te kunnen zetten. Om te voldoen aan de richtlijn van het energieverbruik die zijn opgesteld in de paragraaf 5: Blokschema niveau. Zonder de Versterkers uit te zetten wordt er een minimaal vermogen van 2 mW door de $I_{\text{Quiescent}}$. Dit kan beperkt worden

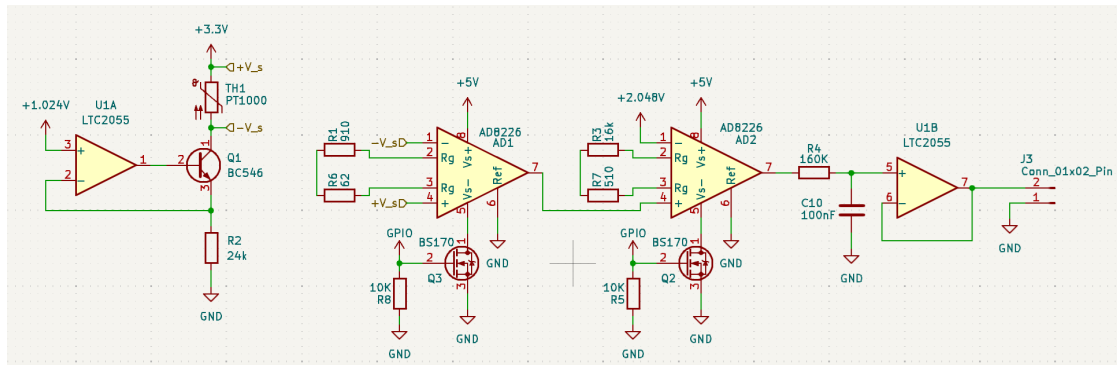
een schakelaar in de voedingslijn te plaatsen die door de microcontroller bepaald kan worden. Dit zorgt ervoor dat de versterkers alleen aan staan als de er gemeten moet worden. Hierdoor is het mogelijk om het energieverbruik te verlagen van minimaal 2 mW naar 65 μ W. Dit komt door dat de sensor lang in rust modus staat en maar heel kort data aan het verwerken is op de microcontroller. Deze schakelaar kan gerealiseerd worden door een N-channel mosfet te plaatsen in voedingslijn tussen GND en de minvoedingspin van de AD8226. Dit is weergegeven in Figuur 18. Met deze aanpassing is het vermogensverbruik onder de richtlijn en zorgt dit ervoor dat er meer vermogen ergens anders gebruikt kan worden.



Figuur 18: Schematische weergave van Instrumentatie versterker opbouw.

7.5 Anti aliasing filter

Het signaal dat door van de Pt1000 door de instrumentatie versterker wordt geleverd aan de ADC. Dit signaal kan door EMC en storing verstoord worden in hoge frequentie gebied. Om dit te minimaliseren is een anti aliasing filter nodig dat deze frequentie wegdempt. Dit wordt gedaan door een enkele orde Butterworth die een kantelpunt heeft van 10 Hz. Hierdoor wordt de informatie van de Pt1000 niet vervormd door het filter en worden hogere frequentie weg gedempt. Na de anti aliasing filter is een opamp geplaatst als buffer om te voorkomen dat de ADC het filter gaat beïnvloeden. Nu met dit filter is het mogelijk om de volledige Temperatuur sensor te gaan opbouwen en testen. In Figuur 19 is het volledige schema weergegeven.



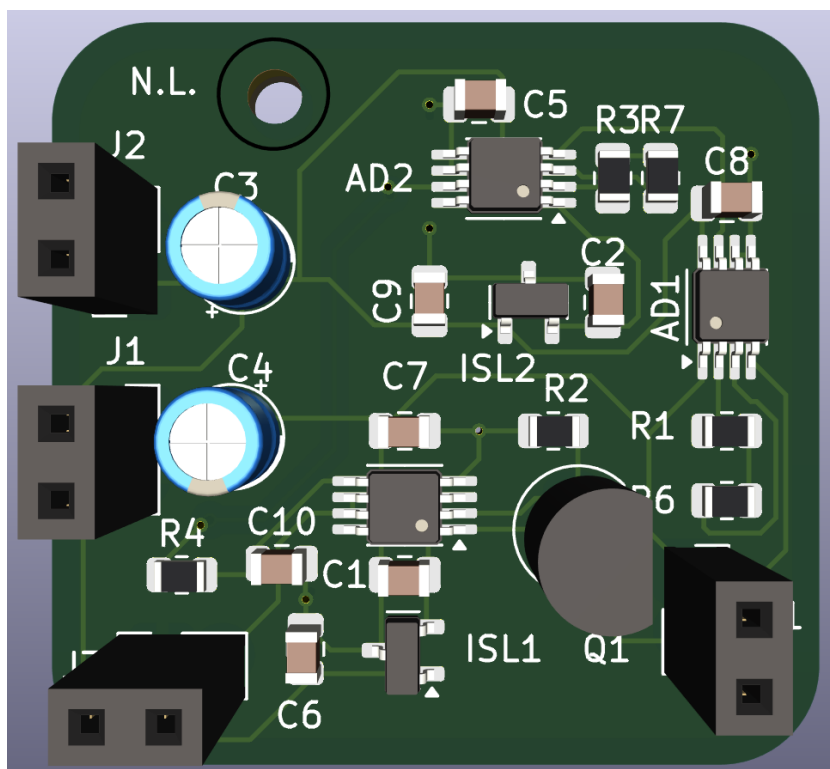
Figuur 19: Volledig schema voor de temperatuur sensor tot aan de ADC.

7.6 Zender

8 Validatie en kalibratie

9 EMC

Tijdens de lessen van het vak zijn manieren behandeld om ervoor te zorgen dat systemen minder beïnvloed worden door elektromagnetische signalen van buiten af. Tijdens het ontwerpen van deze applicatie is er geprobeerd rekening te houden met deze informatie. Dit is gedaan door alle connector van de sensor PCB aan één kant te plaatsen. Hierdoor wordt de PCB niet een dipole antenne en pikt hij minder Elektromagnetische straling op. Een weergave van de PCB is weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20: De ontworpen PCB voor de temperatuur sensor die direct op de ADC en voedingen aangesloten kan worden.

Referenties

- [1] Wanneer is het te warm om te werken? arboportaal. [Online]. Available: <https://www.arboportaal.nl/documenten/vragen-en-antwoorden/wat-is-te-warm>
- [2] Dit is de ideale kantoortemperatuur werk & veiligheid - kennisplatform over preventie, ri e en sociale veiligheid. [Online]. Available: <https://www.werkenveiligheid.nl/preventie/de-praktijk/dit-de-ideale-kantoortemperatuur>
- [3] Alle ins en outs van wetgeving en normen. [Online]. Available: <https://www.euronorm.net/content/template2.php?itemID=423>
- [4] wetten.nl - regeling - regeling gebruik van frequentieruimte zonder vergunning en zonder meldingsplicht 2015 - bwbr0036378. [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0036378/2021-12-15>
- [5] RS, “Thermocouple selection guide,” 2024. [Online]. Available: <https://assets.rs-online.com/image/upload/v1563475663/MKT/LP/Suppliers/rspro/thermocouples/RS-Pro-Thermocouple-Selection-Guide.pdf>
- [6] Elektronica/opamps/lineaire schakelingen/instrumentatieversterker - wiki-books. [Online]. Available: https://nl.wikibooks.org/wiki/Elektronica/Opamps/Lineaire_Schakelingen/Instrumentatieversterker
- [7] T. connectivity, “Ptf-family platinum temperature sensors product description,” 2024. [Online]. Available: <https://www.te.com/usa-en/product-NB-PTCO-165.datasheet.pdf>
- [8] Aeca, “Pt 1000 resistor table pt 100 / pt 500 /pt 1000 temperature resistor,” 2007. [Online]. Available: <http://www.solarhotusa.com/products/controls/files/Resistor-table-Pt1000.pdf>
- [9] R. E. Corporation, “Isl60002 datasheet,” 2019. [Online]. Available: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/RNCC/RNCC-S-A0010774807/RNCC-S-A0010775204-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>
- [10] Ltc2055 datasheet and product info — analog devices. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ltc2055.html>
- [11] M. T. Inc., “Mcp6001/1r/1u/2/4 features,” 2020. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>
- [12] onsemi, “Your feedback is important to us! help us improve-take the survey,” 2024. [Online]. Available: www.onsemi.com

- [13] Ad8220 datasheet and product info — analog devices. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad8220.html>
- [14] Ad8226 datasheet and product info — analog devices. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad8226.html#part-details>
- [15] Ina828 data sheet, product information and support — ti.com. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/INA828>

10 Bijlage

De bijlage voor verslag voor het vak Systeemontwerp.

10.1 Ruis berekeningen voor de temperatuur sensor

```
close all;
clear

f_high = 1; % Bovenste frequentiegrens voor de
    berekeningen
% de sensor heeft een regeltijd van 10 Seconden in een
    omgeving waar het waait met 1 m/s

run('Octave_input_noise.m');

low_voltage_sensor = I_sensor * 980 * 52 * 4;
high_voltage_sensor = I_sensor * 1194 * 52 * 4;
voltage_sensor = high_voltage_sensor - low_voltage_sensor;
voltage_ADC = 3.3;
bit_resolution = voltage_ADC/(2^12);

frequentie = logspace(-1, 7, 100000);

%k = physconst('Boltzmann');
k = 1.380649e-23; % Boltzmann constant in J/K

% source impedance %
R_source = 1180;
source_impedance = R_source;

% Pre-amp %
%overdracht amplifier
gain = 52; %versterking van amplifier
fc = 350e3; %cutoff frequentie amplifier
R = 1;
C = 1 / (2 * pi * R * fc);

H = 1 ./ sqrt(1 + (frequentie * 2 * pi * R * C).^2 );
```

```
transfer_amplifier = H * gain;
%semilogx(frequentie,H);

%Equivalent Voltage Input Noise from amplifier
%Breedbandruis
broadband_voltage_noise = 22e-9;
%1 over F ruis op 1 Hz
voltage_noise_low = 30e-9;
%1 over F ruis
one_over_F_voltage_noise = (sqrt((voltage_noise_low)^2 - (
    broadband_voltage_noise)^2) ./ (frequentie));
%total
voltage_noise_amplifier = sqrt((one_over_F_voltage_noise)
    .^2 + (broadband_voltage_noise)^2);
%Equivalent Current Input Noise from amplifier
current_noise_amplifier = 1e-13;
voltage_current_noise = current_noise_amplifier .*
    source_impedance;
%Voltage Input Noise from Feed_back_resistor
Feed_back_resistor = 972;
Noise_Feed_back_resistor = sqrt(4 * k * T *
    Feed_back_resistor);
%Input Noise
Input_Noise = sqrt(4 * k * T * R_source + (I_n_total_input
    *1194).^2);
%total Voltage Input Noise from amplifier
total_voltage_noise_input = sqrt((voltage_noise_amplifier)
    .^2 + (voltage_current_noise).^2 + (Input_Noise).^2 +
    (Noise_Feed_back_resistor).^2);
%output noise amplifier
output_noise_amplifier = total_voltage_noise_input .*
    transfer_amplifier;

%overdracht amplifier
gain_2 = 4; %versterking van amplifier
fc = 350e3; %cutoff frequentie amplifier
R = 1;
C = 1 / (2 * pi * R * fc);

# geen idee wat dit is moet ik nog uitzoeken
```

```
source_impedance = 10;

H_2 = 1 ./ sqrt(1 + (frequentie * 2 * pi * R * C).^2 );
transfer_amplifier_2 = H_2 * gain_2;

%Equivalent Voltage Input Noise from amplifier
%Breedbandruis
broadband_voltage_noise = 50e-9;
%1 over F ruis op 1 Hz
voltage_noise_low = 100e-9;
%1 over F ruis
one_over_F_voltage_noise = (sqrt((voltage_noise_low)^2 - (
    broadband_voltage_noise)^2) ./ (frequentie));
%total
voltage_noise_amplifier = sqrt((one_over_F_voltage_noise)
    .^2 + (broadband_voltage_noise)^2);
%Equivalent Current Input Noise from amplifier
current_noise_amplifier = 1e-13;
voltage_current_noise = current_noise_amplifier .*
    source_impedance;
%Voltage Input Noise from Feed_back_resistor
Feed_back_resistor = 16500;
Noise_Feed_back_resistor = sqrt(4 * k * T *
    Feed_back_resistor);
%Input Noise
Input_Noise = sqrt((output_noise_amplifier).^2 + (
    U_n_ref_total_new).^2);
%total Voltage Input Noise from second amplifier
total_voltage_noise_input_2 = sqrt((
    voltage_noise_amplifier).^2 + (voltage_current_noise)
    .^2 + (Input_Noise).^2 + (Noise_Feed_back_resistor).^2);
%output noise second amplifier
output_noise_amplifier_2 = total_voltage_noise_input_2 .*
    transfer_amplifier_2;

output_noise_rc = (1 ./ sqrt(1 + (frequentie * 2 * pi * 1
    * (1 / (2 * pi * 1 * 10))))).^2 )) .*
    output_noise_amplifier_2 .* (1 ./ sqrt(1 + (frequentie
    * 2 * pi * 1 * (1 / (2 * pi * 1 * 5e5))))).^2 ));
```

```
% Maak een interpolatiefunctie van
    output_noise_amplifier_2 afhankelijk van frequentie
output_noise_func = @(f) interp1(frequentie,
    output_noise_rc, f, 'linear');

Ruis_vermogen = integral(output_noise_func, 0.1, f_high);
SNR_versterker = 20 * log10(voltage_sensor/Ruis_vermogen);

disp(['Spanningsbereik_van_de_uitgang_sensor_', num2str(
    voltage_sensor), '_V']);
disp(["Spanning_van_de_temperatuur:" num2str(
    voltage_sensor/600), "V/_0.1_graden_Celcius"]);
disp(['Spanning_resolutie_van_de_bits_', num2str(
    bit_resolution), '_V']);
disp(['Totale_spannings_ruis_integreed_over_de_bandbreedte
    :_', num2str(Ruis_vermogen), '_V']);
disp(['SNR_van_het_totale_systeem:_', num2str(
    SNR_versterker), '_dB']);

loglog(frequentie, output_noise_rc);
hold on
%loglog(frequentie, total_voltage_noise_input);
%hold on

xlabel('frequentie_Hz', "fontsize", 40);
ylabel('v/sqrt(Hz)', "fontsize", 40);
set(gca, 'FontSize', 40); % aanpassing voor de
    eenheidstapjes (ticks)
grid on;
pause;
```

Listing 1: Octave code voor de ruis berekeningen van de temperatuur sensor

10.2 Ruis berekeningen voor de Stroombron

```
% Gegeven waarden
R = 24000; % Weerstand in Ohm
c = 55; % temperatuur in celcius
T = c + 273,15; % temperatuur in kelvin
k_B = 1.380649e-23; % Boltzmann constante
I_sensor = (128/3)* 10 ^ -6;

% Witte ruiswaarden
U_white_ref = 2e-6; % Spanningsreferentie witte ruis in V
    /sqrt(Hz)
U_white_opamp = 90e-9; % Opamp witte ruis in V/sqrt(Hz)

% Frequentiegrenzen
f_cutoff = 10; % Frequentie waar de witte ruis het
    overneemt (10 Hz)
f_low_ref = 0.1; % Lagere frequentiegrens voor referentie
f_low_opamp = 0.01; % Lagere frequentiegrens voor opamp

% Functie voor integratie van 1/f-ruis
function result = integrate_flicker_noise(low_f, cutoff_f,
    A)
    result = A * log(cutoff_f / low_f);
end

% Ruissterkte (A bepaald uit witte ruis bij 10 Hz)
A_ref = U_white_ref * f_cutoff; % Voor de referentie
A_opamp = U_white_opamp * f_cutoff; % Voor de opamp

% Nieuwe cutoff frequentie gebaseerd op de bovenste grens
    van 5 Hz
f_cutoff_new = min(f_cutoff, f_high);

% Integreer 1/f-ruis voor zowel de referentie als de opamp
U_n_ref_flicker_new = integrate_flicker_noise(f_low_ref,
    f_cutoff_new, A_ref);
U_n_opamp_flicker_new = integrate_flicker_noise(
    f_low_opamp, f_cutoff_new, A_opamp);
```

```
% Aangepaste totale ruis (alleen flicker noise tot de
    nieuwe cutoff)
U_n_ref_total_new = U_n_ref_flicker_new; % Geen witte
    ruis boven 5 Hz
U_n_opamp_total_new = U_n_opamp_flicker_new; % Geen witte
    ruis boven 5 Hz

% Stroomruis omrekenen (spanningsruis gedeeld door
    weerstand)
I_n_ref_total_new = U_n_ref_total_new / R;
I_n_opamp_total_new = U_n_opamp_total_new / R;

% Thermische ruis van de weerstand
I_n_resistor = sqrt(4 * k_B * T / R);

% Totale stroomruis kwadratisch optellen inclusief
    weerstand
I_n_total_input = sqrt(I_n_ref_total_new^2 +
    I_n_opamp_total_new^2 + I_n_resistor^2);

SNR = 20*log10(I_sensor/I_n_total_input);

% Resultaten weergeven
disp(['Stroomruis_van_de_spanningsreferentie:', num2str(
    I_n_ref_total_new), ' uA/sqrt(Hz)']);
disp(['Stroomruis_van_de_opamp:', num2str(
    I_n_opamp_total_new), ' uA/sqrt(Hz)']);
disp(['Thermische_stroomruis_van_de_weerstand:', num2str(
    I_n_resistor), ' uA/sqrt(Hz)']);
disp(['Totale_stroomruis:', num2str(I_n_total_input), ' uA
    /sqrt(Hz)']);
disp(['SNR:', num2str(SNR), ' dB']);
```

Listing 2: Octave code voor de ruis berekeningen van de Stroombron

Lijst van figuren

1	Systeem ontwerp	6
2	Temperatuur sensor subsysteem.	6
3	Relatieve luchtvochtigheid subsysteem.	7
4	Signaal bewerking subsysteem.	8
5	Zend module subsysteem.	8
6	Ontvangst module subsysteem.	9
7	Blokschema opgebouwd uit alle subsystemen.	10
8	Flow chart digitale signaal bewerking.	12
9	Blokschema opgebouwd uit meer basis functies.	14
10	Verschillende type temperatuur sensoren [5].	15
11	Stroombron schema	16
12	Schematische weergave van een Instrumentatie versterker [6].	17
13	De sensor en versterker blokken uitgewerkt.	17
14	De Pt1000 met een constante Stroombron.	20
15	Schematische weergave van de versterker implementatie.	24
16	Schematische weergave van de versterker implementatie.	25
17	Spectrale ruis van de Temperatuur sensor over een frequentie bereik van 0,1 Hz tot 10 MHz.	26
18	Schematische weergave van Instrumentatie versterker opbouw.	27
19	Volledig schema voor de temperatuur sensor tot aan de ADC.	28
20	De ontworpen PCB voor de temperatuur sensor die direct op de ADC en voedingen aangesloten kan worden.	31

Lijst van tabellen

1	Specificaties op systeemontwerpniveau.	6
2	Specificaties van Temperatuur sensor subsysteem	7
3	Specificaties van Relatieve luchtvochtigheid sensor subsysteem	7
4	Specificaties van Signaal bewerking subsysteem	8
5	Specificaties van Signaal bewerking subsysteem	9
6	Specificaties van Signaal bewerking subsysteem	9
7	Vermogens verdeling van de applicatie op blokschema niveau.	11
8	Specificaties van Stroombron voor de platina-weerstand	16
9	Vergelijking verschillende versterkers.	25
10	SNR van de twee mogelijke versterkers.	26