

MEMS-microfoon

ontwerp en constructie

Peter Riccardi (Verenigde Staten)

Je kunt duizenden dollars uitgeven aan een vrije-veld microfoon. Maar kijk voordat je dat doet eerst eens naar dit MEMS-gebaseerde ontwerp, dat uitstekende prestaties biedt tegen een fractie van de kosten.

Akoestici en geluidstechnici vertrouwen op meetmicrofoons om geluidssignalen op te nemen tijdens experimenten. Typische vrije-veld condensatormicrofoons van firma's als PCB Piezotronics kosten meer dan \$ 1000. De kwaliteit van zulke microfoons is uitstekend, maar voor een fractie van de prijs zijn alternatieven beschikbaar voor hobbyisten en liefhebbers die de prestaties leveren die je nodig hebt. Hier bekijken we een MEMS-gebaseerd ontwerp met als doel een zo laag mogelijke ruisvloer en een vlakke frequentierespons in de audio-band van 20 Hz tot 20 kHz.

Het prototype moet goedkoop zijn, eenvoudig te ontwerpen en te bouwen, en naadloos passen in de typische workflow van experimentele akoestici. Typische akoestische experimenten worden aangestuurd met IEPE DAQ-inputs, dus deze microfoon werkt met IEPE-excitatie [1]. Dit zorgt voor het benodigde vermogen voor de voorversterker en de MEMS-elementen. De technologie van MEMS-microfoons is de laatste jaren verbeterd, dus hun ruisvloer is vrij laag. Analoge middelen door gebruik te maken van een parallelle array zal de ruis verder verminderen; deze werkwijze zal hier worden toegepast.

Elektrisch ontwerp

Er zijn veel soorten MEMS-microfoons die in dit project gebruikt zouden kunnen worden. Hier is gekozen voor de TDK ICS-40300 vanwege zijn ver in het laag doorlopende frequentierespons (door middel van een 'extended back volume') van 6...20.000 Hz, een redelijke gevoeligheid van -45 dBV bij 94 dB SPL, en een lage ruisvloer van -108 dBV. Mechanisch is de microfoon ondergebracht in een behuizing met een nominale diameter van 0,5". Hierdoor heeft hij een kleine vormfactor en kan hij eenvoudig gebruikt worden in een akoestisch lab met bestaande kalibratoren, microfoonstatieven enzovoort. Een BNC-connector aan de achterkant van de behuizing haalt de IEPE-voeding binnen en voert de spanningsgemoduleerde golfvorm uit. We gebruiken een array

om de ruisvloer te verlagen. Het doel is een array met vier elementen, wat een maximale ruisverbetering van 6 dB oplevert. Voor een zo groot mogelijk dynamisch bereik tilt de voorversterker het maximaal verwachte uitgangssignaal van de microfoon op naar de voedingsrail, in dit geval 3,3 V. Volgens de datasheet is de maximale uitgangsspanning $0,355 V_{rms}$ @ 130 dB SPL. Een paar snelle berekeningen leveren gemakkelijk te begrijpen waarden.

Ten eerste moet de gevoeligheid worden uitgedrukt in de eenheid mV/Pa. Het geluidsdrukniveau (SPL) heeft de vorm:

$$dB\ SPL = 20 \log_{10} (P_{rms}/P_{ref})$$

SPL is een decibelwaarde. P_{rms} is de RMS-waarde (root mean square) van de gemeten druk. P_{ref} is de referentiedruk (20 μ Pa in lucht). Uit het losse polsje komen we uit op 1,417 Pa_{pk} bij de nominale gevoeligheid van -45 dBV. Nu moet de spanning (in mV) op dezelfde manier worden afgeleid van de gegeven waarde van -45 dBV. Hier wordt aangenomen dat de 'referentie'-spanning 1 V is:

$$dBV = 20 \log_{10} (V/1\ V)$$

wat een piekspanning van 5,623 mV_{pk} oplevert. Opmerking: SPL gaat per definitie uit van een RMS-druk. De spanning is in decibel, dus zowel de teller als de noemer van de logaritmfunctie worden verondersteld piekwaarden te zijn. Door de piekspanning te delen door de piekdruk, kan de gevoeligheid worden berekend:

$$gevoeligheid = 1,417\ Pa_{pk} / 5,623\ mV_{pk} = 3,968\ mV/Pa$$

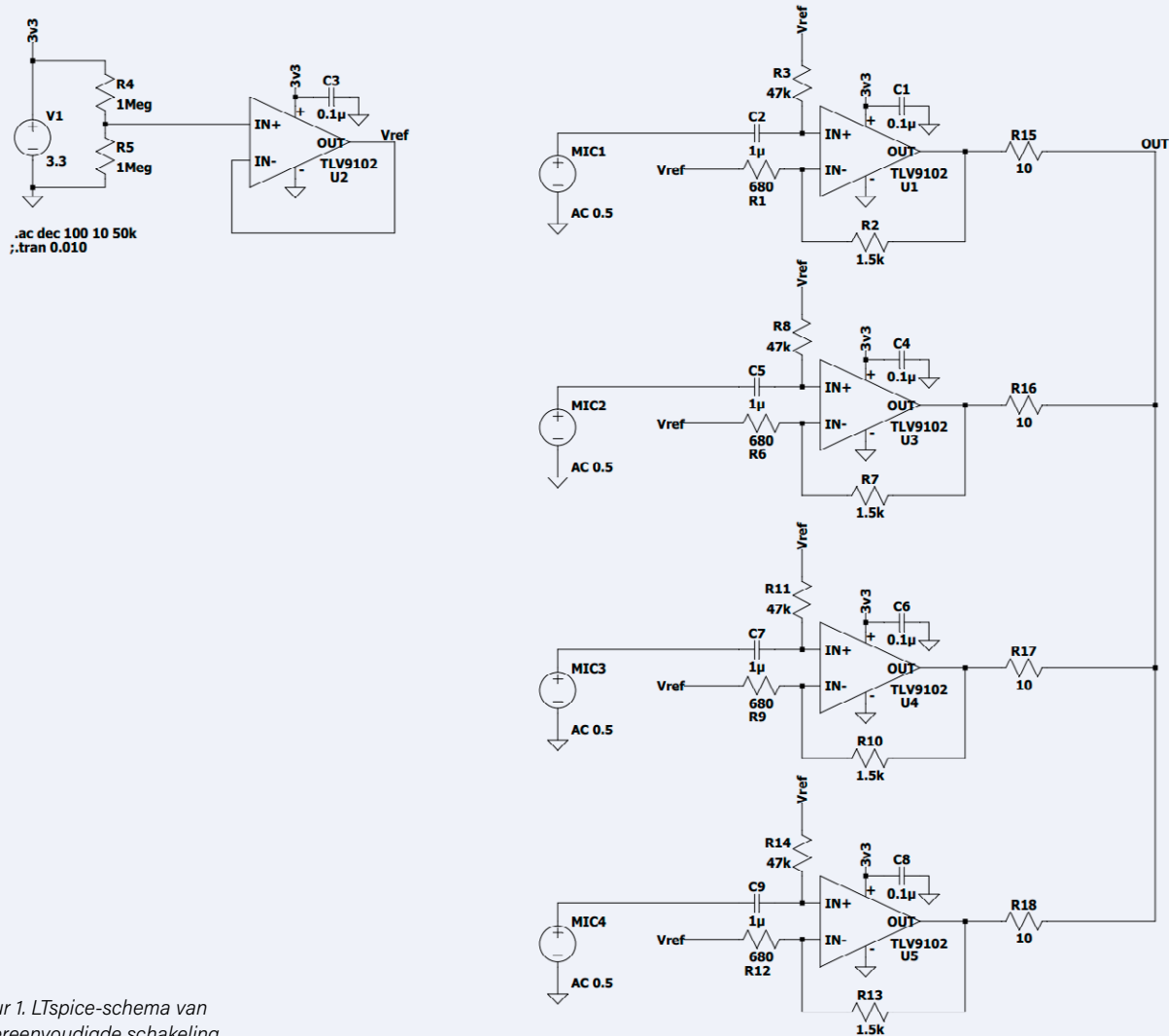
De gevoeligheid wordt vermenigvuldigd met de eventuele versterking door de voorversterker, dus de gevoeligheid kan worden herschreven als:

$$gevoeligheid = 3,968\ mV/Pa * A$$

met

A = versterking

Dit is ver verwijderd van de 'typische' gevoeligheid van 50 mV/Pa, maar is een noodzakelijk compromis om de laagspanning-MEMS-elementen te kunnen gebruiken met een breed dynamisch amplitude-



Figuur 1. LTspice-schema van de vereenvoudigde schakeling.

bereik tot 130 dB SPL. Een typische condensatormicrofoon kan wel 20 V_{pk-pk} bereiken bij modellen voor lagere spanningen. Deze gevoeligheid kan worden verhoogd door de voorversterker wat extra versterking te laten leveren. Om het dynamische bereik van ons systeem te maximaliseren, moet de headroom in acht worden genomen. We hebben gekozen voor laagspanningsversterkers met een 3,3V-rail. Dit garandeert een laag stroomverbruik, terwijl de spanningszwaai die het systeem kan produceren wordt gemaximaliseerd. De datasheet specificeert de maximale uitgangsspanning van de microfoon bij de hoogste nominale druk die hij kan meten; deze waarde kan worden gebruikt om de benodigde versterking te berekenen. Volgens de datasheet is de maximale uitgangsspanning:

$$V_{out} = 0,355 V_{rms}$$

De uitgangsspanning (piek-piek) is ongeveer:

$$V_{out} = 0,355 * 1,414 = 1 V_{pk-pk}$$

De totale zwaai van een rail-to-rail opamp die op een enkele 3,3V-voedingsspanning draait is ongeveer 3,3 V. De versterking moet, om die maximale zwaai te bereiken, dus zijn:

$$A = \frac{output}{input} = \frac{3,3V_{pk-pk}}{1,00V_{pk-pk}} = 3,3$$

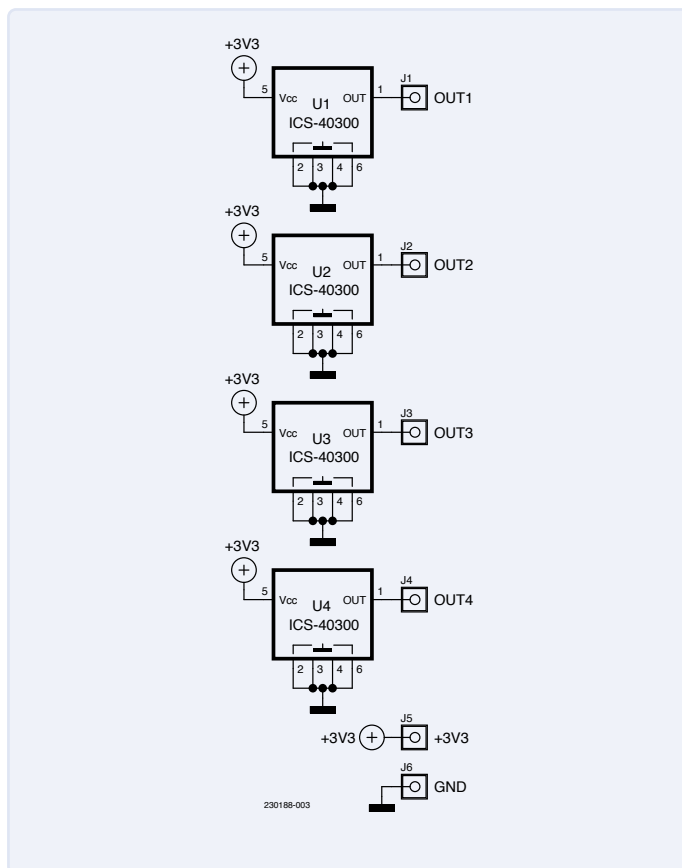
Dit impliceert ook het gebruik van een virtuele massa op 3,3 V/2 = 1,65 V; dat zal daarom de referentiespanning V_{ref} zijn die in dit ontwerp wordt gebruikt. De microfoonelementen kunnen een aanzienlijke DC-offset vertonen, dus de uitgangen van elke microfoon moeten AC-gekoppeld worden via een eenvoudig RC-filter. Hier worden een condensator van 1 µF en een weerstand van 47 kΩ gebruikt, die een kantelfrequentie opleveren van:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6,28 * 47.000 * 0,000001} = 3,4Hz$$

Deze relatief hoge afsnijfrequentie werd gekozen zodat een kleine 0603-condensator met geschikte werkspanning kon worden gebruikt.

De schakeling

De schakeling van **figuur 1** is een vereenvoudigd schema dat de voorgestelde topologie illustreert. Het uitgangsknooppunt met vier 10Ω-weerstanden middelt de signalen op analoge wijze. Theoretisch zijn de ruis die wordt gegenereerd door alle opamps en de ruis die (elektrisch) wordt gegenereerd in de MEMS-microfoons niet gecorreleerd. Het is dus mogelijk om een maximale verbetering van de ruisvloer van 6 dB te bereiken. Dit wordt echter gecompliceerd door het feit dat de ruis die op de uitgang kan verschijnen niet alleen te wijten is aan de elektronica. De MEMS-microfoons zijn onderhevig aan akoestische ruis door de interactie van lucht moleculen met de membranen. Het



Figuur 4. Schema van de MEMS-'carrier' – een kleine ronde print waarop de vier microfoons zijn geplaatst en die een aantal soldeereilandjes heeft voor de uitgangssignalen naar de voorversterker en voor voeding en massa. Er zijn in totaal zes 'J'-aansluitingen: vier uitgangssignalen en 3,3 V en GND.

We hebben een NI 4431 gebruikt als een geschikte 'referentie'-DAQ omdat National Instruments veel gebruikt wordt in akoestisch onderzoek en hun IEPE-bronnen allemaal vergelijkbaar zijn. De 4431 levert 2,1 mA uit en heeft een compliantiespanning van meer dan 20 VDC. Als dat het DC-werkpunt van het systeem binnen deze grenzen ligt, zal de schakeling functioneren. Er moet rekening worden gehouden met voldoende headroom zodat de maximale wisselspanning die op de gelijkspanning is gesuperponeerd niet hoger is dan de gespecificeerde maximumwaarden.

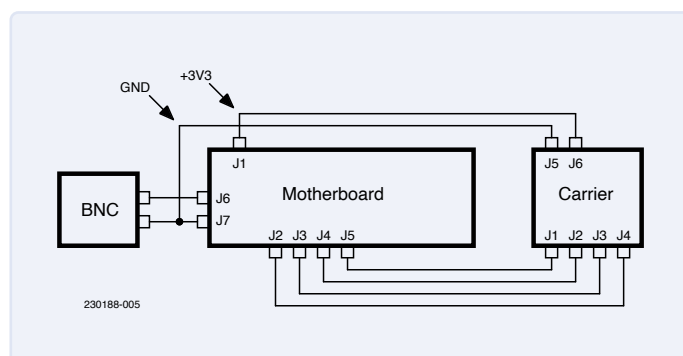
De constante stroom van 2,1 mA kan nu worden gebruikt om de voedingsdistributie te ontwerpen. We gebruiken zener-shuntregelaars vanwege de geringe kathodestroom en het gebruiksgemak. De opamps en MEMS-microfoons verbruiken de meeste stroom, volgens hun datasheets namelijk:

$$I_q = 150 \mu A \text{ en } I_q = 250 \mu A$$

Uitgaande van vijf opamps en vier MEM's is de voedingsstroom gelijk aan 1,75 mA. De resterende 350 μA voedt de shuntregelaars. De zener-regelaar die de 3,3V-rail voedt, heeft een weerstand om de kathodestroom in te stellen. De TLVH432 is gekozen als zener-referentie omdat deze instelbaar is. Hij werkt met een kathodestroom van 100 μA . De bias-spanningsregelaar heeft geen serieweerstand om



Figuur 5. De gebouwde microfoon, in een 3D-geprinte behuizing met de afdekking verwijderd. De uiteindelijke behuizing is te groot voor een standaard 0,5"-ontwerp, maar het komt redelijk in de buurt voor een snelle 'proof of concept.'



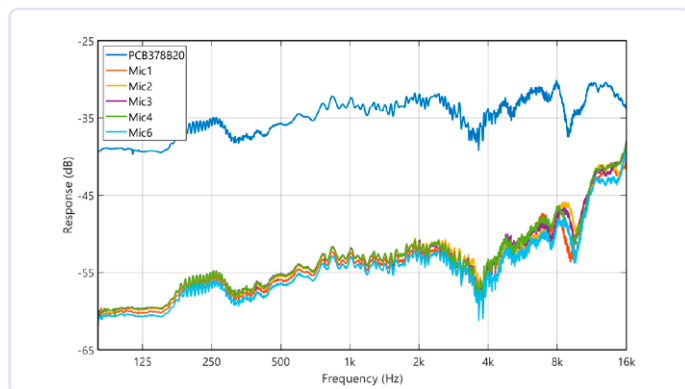
Figuur 6. Bedradingsschema voor de schakeling zoals hier besproken. De blauwe draden zijn de signalen, zwart is massa en rood is de voeding. Het 'motherboard' is de voorversterker en op de 'carrier' zitten de vier microfoons.

zijn kathodestroom in te stellen. Hij 'absorbeert' eenvoudigweg het verschil tussen de stroom die door de schakeling wordt verbruikt en de 2,1mA-voedingsstroom.

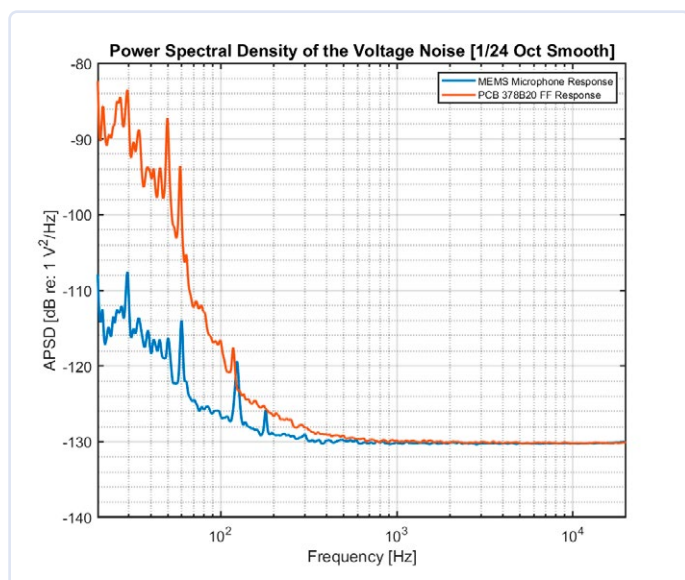
Een uitgebreid voorbeeld van alle berekeningen is te vinden in de application note van Analog Devices [4]. Vanwege leveringsproblemen en moeilijkheden met de verkrijgbaarheid van veelgebruikte zenerreferenties, kan eventueel worden uitgeweken naar een zwevende spanningsreferentie met twee weerstanden en een NPN-BJT van het type 2N2222A (hint: kijk eens naar de 'discrete 741 opamp-schakelingen').

Prototype van voorversterker en microfoon

Figuren 3...6 illustreren het uiteindelijke ontwerp. Er werden twee printen ontworpen, een kleine ronde printplaat voor de vier microfoon-elementen en een kleine langwerpige print voor de elektronica van de



Figuur 7. De frequentierespons van vijf MEMS-microfoons vergeleken met een PCB378B20 vrije-veld microfoon. De metingen vonden plaats in een semi-anechoïsche kamer met frequenties boven 200 Hz. De algemene trend van de MEMS-microfoons en de commerciële microfoon zijn vergelijkbaar. De meeste van de pieken zijn niet elektrisch van aard, maar eerder te wijten aan de complexe akoestische interacties van (ongewenste) reflecties van de microfoonstandaard en andere harde oppervlakken in de kamer. Opmerkelijk verschil is de opwaartse trend bij de MEMS-elementen boven 10 kHz, in overeenstemming met de frequentierespons zoals in de datasheet gegeven.



Figuur 8. Spanningsruis gemeten in een semi-anechoïsche kamer zonder geluid en zonder gevoeligheidscorrectie (ruwe spanningsgolfvormen). Boven 1 kHz benaderen zowel de MEMS-microfoon als de commerciële microfoon de ruisvloer van de DAQ.

voorversterker. De schakeling werd na bedrading gemonteerd in een 3D-geprinte behuizing met afmetingen die dicht in de buurt komen van die van een standaard 0,5"-meetmicrofoon. Zie **figuren 7 en 8** voor de meetresultaten.

Conclusies en correcties

Het eerste dat moet worden opgemerkt, is de duidelijke fout in het schema van figuur 3. Het ontwerp in dat schema werd in korte tijd gemaakt om aan de financieringseisen van het oorspronkelijke project te voldoen. Er was geen tijd voor enige vorm van simulatie. Daardoor werd de voor de hand liggende fout van de overbelaste voedingsrail over het hoofd gezien. Hoewel de voedingsstroom van die rail erg klein is, en dus bij normale 'controle' de spanningsdeler 'stijf' genoeg lijkt te zijn, is er nog een ander probleem. De opamps sturen hun uitgangen actief aan via de laagohmige terugkoppeling om de inverterende ingang gelijk te maken aan de niet-inverterende ingang. Er is slechts

een weerstand van 680 Ω tussen de niet-inverterende ingang en de uitgang van de deler aanwezig. De spanningsdeler heeft een weerstand van 1 M Ω tussen de aftakking en de gestabiliseerde voedingsrail. Dus in feite stuurt de opamp via zijn laagohmige terugkoppeling dat knooppunt actief aan om het gelijk te maken aan zijn eigen uitgang. Het gevolg is dat het referentieknooppunt de uitgang volgt en in wezen verandert in een spanningsvolger, maar met mogelijke extra storing. Alle metingen zijn uitgevoerd met de originele schakeling zoals getekend in figuur 3. De ruismetingen kunnen dus zeker nog betere resultaten hebben. De geïnteresseerde lezer die de berekeningen uitwerkt, zal misschien de geringe gevoeligheid van de gemeten frequentieresponsfunctie opmerken. Dit komt doordat de versterker slechts eenmaal versterkte, dus de gevoeligheid was ongeveer 10 dB lager. Als dit board opnieuw wordt opgezet, zal voor een goede werking een buffer absoluut nodig zijn.

Bouw

In de toekomst moet de behuizing mechanisch robuuster worden gemaakt. De bouw was vrij moeilijk omdat er verschillende kleine details waren die de minimale wanddikte van een printer met een spuitmondje van 0,4 mm benaderden. De beste oplossing is waarschijnlijk een microfoonontwerp met een nominale diameter van 1". Het was altijd de bedoeling dat de printen voor een eenvoudige montage van flexibel materiaal zouden worden gemaakt. Door tijdsbeperkingen voor het vroege prototype was dit niet mogelijk. Het combineren van de carrierprint en de voorversterker op een enkel ontwerp zonder de handmatige bedrading tussen de twee printen zal de complexiteit sterk vereenvoudigen en de assemblagetijd verkorten. De totale kosten om een van deze units te bouwen lagen rond de \$ 30; het gemeten ruisgetal en de frequentierespons zijn verrassend goed, de geringe kosten in aanmerking nemend.

Alle bestanden zijn te vinden in de Hackaday-post van dit project [5].

230188-03 (vertaling: Jelle Aarnoudse)

Opmerking van de auteur

Ik wil het SPRAL-team van de Pennsylvania State University bedanken voor hun hulp bij het verkrijgen van de metingen in de dode kamer, en ik wil in het bijzonder Zane Rusk bedanken voor zijn onvermoeibare steun. Ook wil ik de Acoustical Society of America Chapter aan de Pennsylvania State University bedanken voor hun steun bij het voortzetten van het project en het presenteren van het werk. PCBway sponsorde de bouw van vijf MEMS-microfoons en leverde alle onderdelen gratis. Ik wil hen bedanken voor hun steun aan het project, waardoor afstuderende studenten deze meetmicrofoons zonder kosten konden ontwerpen, bouwen en testen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via pjriccardi@pjroses.co of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteur

Peter Riccardi werkt momenteel in de lucht- en ruimtevaart als avionica-ingenieur (elektronica). Zijn formele opleiding is werktuigbouwkunde, waarin hij in 2018 afstudeerde aan Rowan University. In 2022 behaalde Peter zijn M.S. in akoestiek aan de Pennsylvania State University. Peter is voornamelijk geïnteresseerd in audio-elektronica en elektroakoestiek; zijn onderzoek stelde een lineair equivalent transductiemodel voor van de luchtbewegings-transformator, een nieuw elektro-akoestisch apparaat. Zijn persoonlijke projecten omvatten maatgesneden rackgemonteerde gemonteerde actieve crossover-netwerken met geïntegreerde eindversterkers, voorversterkers voor draaitafels met lage ruis, speciale draaitafels (mechanische ophanging, motordrivers, behuizing enzovoort).



Gerelateerd product

> **Elektor Audio Collection (USB Stick)**
<https://elektor.nl/19892>

WEBLINKS

- [1] IEPE [Wikipedia]: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_Electronics_Piezo-Electric
- [2] D. Self, "Chapter 1: Basics," Small Signal Audio Design, Focal Press, New York, NY, 2015, pp. 1-16.: <https://amzn.to/43dVyTa>
- [3] T. B. Gabrielson, "Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 40, no. 5, pp. 903-909, May 1993, doi: 10.1109/16.210197: <https://ieeexplore.ieee.org/document/210197>
- [4] Analog Devices, "IEPE-Compatible Interface for Wideband MEMS Accelerometer Sensors," CN-0532, 2020: <https://bit.ly/CN-0532>
- [5] P. Riccardi, "MEMS Based IEPE Powered Instrumentation Microphone," Hackaday.io: <https://hackaday.io/project/185762-mems-based-iepe-powered-instrumentation-microphone>



CODICO®

PIONEERS WANTED

Field Sales Engineer Active Components

CODICO – een succesvolle Design-In Distributeur – is op zoek naar een FSE, die technische en projectondersteuning biedt aan onze klanten en de BENELUX-markt ontwikkelt. Je beschikt over de volgende vaardigheden:

- Diepgaande technische kennis in elektronica
- 3 tot 5 jaar verkoopervaring in de elektronica markt
- Vermogen om technische projecten te identificeren en uit te voeren

Neem een kijkje op onze website en stuur uw sollicitatie per e-mail naar karriere@codico.com.

Wij bieden:

- Internationale werkomgeving
- Uitstekende opleiding
- Vrijwillige sociale voordelen
- Aantrekkelijk salarismodel en auto van de zaak (ook voor privégebruik)
- Kantoor aan huis

CODICO GmbH, Zwingenstraße 6-8, A- 2380 Perchtoldsdorf, +43 1 86 30 50, office@codico.com, www.codico.com