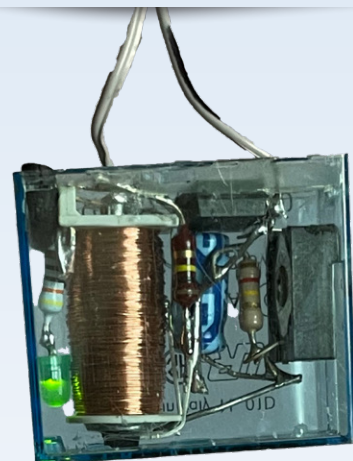


Magnetische levitatie

“the Very Easy Way”

de derde en meest compacte versie



Peter Neufeld (Duitsland)

Laten we eens kijken naar een eenvoudige analoge schakeling om kleine voorwerpen te laten zweven, en die stof biedt voor veel interessante discussies en experimenten. De hardware is vergelijkbaar met het ontwerp dat we eerder in Elektor publiceerden, maar met nog minder componenten. De elektronica past nu zelfs in de behuizing van een aangepast standaardrelais!

Op het Elektor Labs-platform heb ik geschreven over mijn experimenten met magnetische levitatie-schakelingen. De eerste twee versies zijn online en in Elektor Magazine gepubliceerd: de eerste was een volledig analoge oplossing met een LM311-comparator [1], en de tweede stelde een digitale oplossing voor [2], aangestuurd door een ESP32-gebaseerde microcontroller-module. Ik zal hier naar deze artikelen verwijzen als *deel I* en *deel II*. Tijdens enkele nuttige discussies met Elektor Lab-ingenieur Luc Lemmens over magnetische levitatie, kwamen een paar gedachten naar boven die ik heb uitgewerkt om de projecten die ik al had gemaakt te verbeteren en te optimaliseren. Sommige van deze veranderingen waren al doorgevoerd in de schakelingen in deze twee publicaties, maar de discussies brachten ook gedachten op gang over verdere optimalisatie. Het resultaat was weer een flinke vereenvoudiging van de 'oude' analoge schakeling waarmee ik kleine (magnetische) voorwerpen kan laten zweven. Die gaan we in dit artikel bespreken. Dit is het derde en – althans voorlopig – laatste deel over mijn magnetische levitatie-projecten. Hoewel het ontwerp eenvoudiger is vergeleken met de twee andere projecten, is de functionaliteit zeer goed.



Het principe (in het kort)

Het idee achter alle drie de magnetische levitatieprojecten is dat slechts een klein deel van de kracht die nodig is om een voorwerp te laten zweven afkomstig is van het elektromagnetische veld van een aangepaste relaispoel. Het eigenlijke zware werk wordt verricht door de altijd aanwezige kracht tussen een permanente magneet in het zwevende voorwerp en de ijzeren kern van de solenoïde. Een Hall-sensor meet de sterkte van het totale magnetische veld (dat wil zeggen de som van het statische en het elektromagnetische veld). Het spanningsniveau op zijn uitgang is tevens een maat voor de afstand tussen de spoel en het zwevende voorwerp, en wordt gebruikt als feedback-sigitaal om de stroom door de elektromagneet te regelen, die – op zijn beurt – de afstand tussen de kern en het zwevende voorwerp regelt.

Een preset-potmeter wordt gebruikt om de regelkring fijn te regelen en af te stemmen op het magnetische voorwerp dat onder de spoel moet zweven. Wanneer u met deze schakelingen begint te experimenteren, kan de afstelling een echte uitdaging blijken. Als u dat niet voor elkaar krijgt, vindt u in het eerste artikel [1] nuttige tips en trucs. Het is zeker mogelijk, maar er zijn natuurlijk grenzen aan de grootte en het gewicht van het voorwerp dat met het beperkte vermogen van deze schakeling kan worden opgetild.

Vereenvoudigde schakeling

Het schema van de in dit artikel gepresenteerde versie is te zien in **figuur 1**, een 'uitgeklede' versie van de eerste oplossing. Hier zorgt een LM311-comparator [3] voor de relatief kleine stroom door de spoel, zonder dat er een aparte externe stuurtransistor nodig is. Zoals u wellicht weet, heeft de LM311 een open collector-uitgang die een kleine belasting kan aansturen. Dit vereenvoudigt de schakeling aanzienlijk in vergelijking met de eerste volledig analoge oplossing die ik voor deel I ontwierp, waar een BC550 NPN-transistor aan de uitgang van de comparator werd toegevoegd om de elektromagneet van stroom te voorzien.

Om het aantal componenten nog verder te reduceren en nog meer ruimte te besparen, kan ook de instelbare spanningsdeler voor het referentieniveau op de inverterende ingang van de comparator (P1 en R4) worden gewijzigd. Deze twee componenten kunnen worden vervangen door een enkele multiturn-trimmer; de waarde is niet kritisch, alles in het bereik van 1 kΩ tot 1 MΩ is goed. Zoals u in **figuur 2** ziet, passen de 'gewone' preset-potmeter en de vaste weerstand R4 ook in de behuizing van het relais, dus het is niet echt nodig om deze wijziging door te voeren.

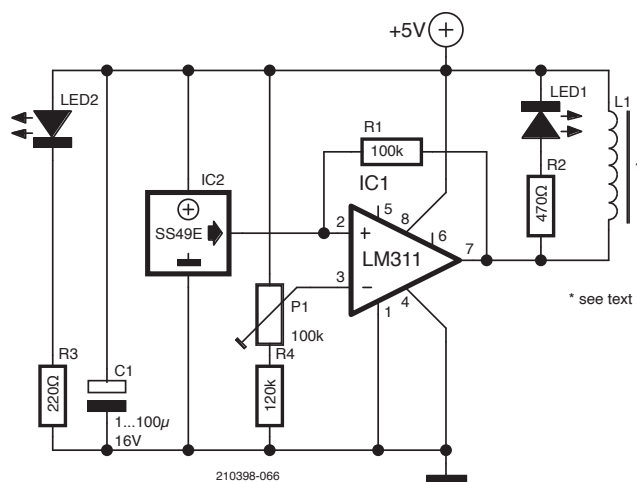
De hier gebruikte componenten zijn standaard, gemakkelijk verkrijgbaar en betaalbaar. In deel I schreven we dat goedkopere en gemakkelijker verkrijgbare Hall-sensoren zoals de SS49E niet bruikbaar waren en dat alleen de A1302 of A1308 van Allegro Microsystems zouden voldoen. In deel II – levitatie op de digitale manier – konden we echter tot onze vreugde melden dat deze veronderstelling onjuist was. Verdere tests toonden aan dat het type en merk van IC2 echt niet zo kritisch is, en dit maakt het een stuk gemakkelijker om de componenten te vinden om deze projecten te bouwen. De Allegro-sensoren zijn duurder en moeilijker te vinden.

Het juiste relais en de aanpassing daarvan

De elektromagneet (L1) bestaat nu uit de solenoïde van een industrieel 5V-relais – een Finder-relais met typenummer 40.52.7005 om precies te zijn. Het is gemakkelijk verkrijgbaar en aanzienlijk gemak-

kelijker aan te passen dan de 5V-relais die we eerder gebruikten. Het volledige aanpassingsproces van het relais wordt geïllustreerd door de foto's in **figuur 3**.

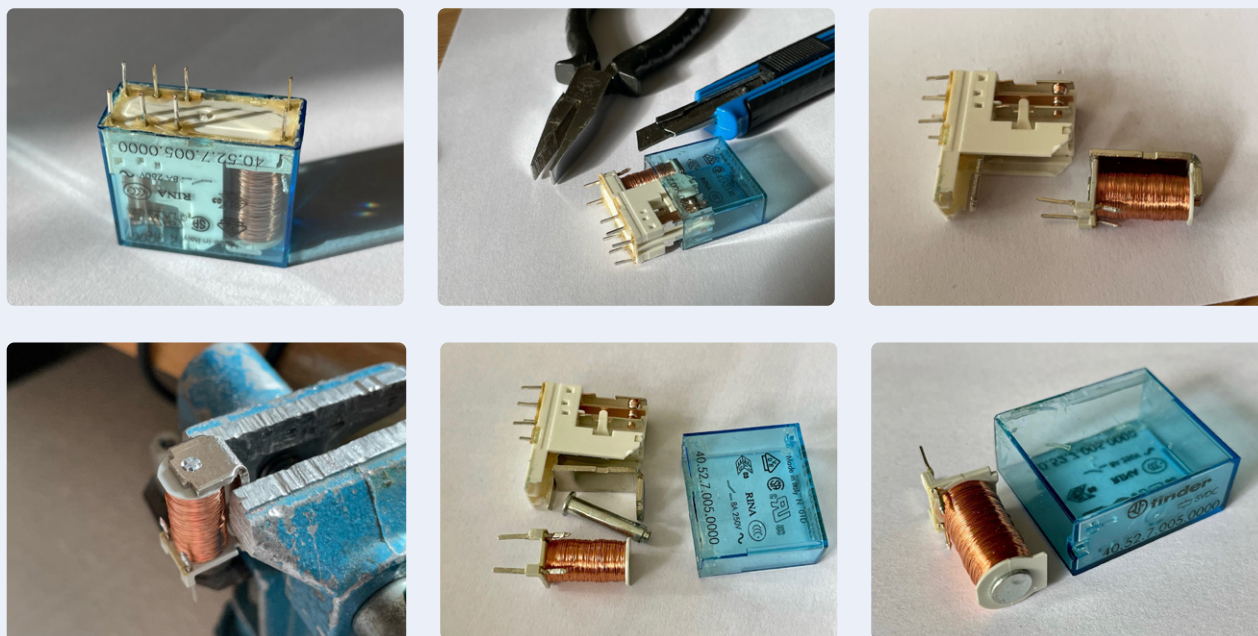
De transparante behuizing van een Finder-relais is vaak vastgelijmd op de voet. U kunt deze echter gemakkelijk openen door de lijmverbinding te verwarmen met een föhn of een hetelucht-soldeerstation bij matige temperatuur. Een hobbymes, ietwat verwarmd, kan nuttig zijn om de behuizing te openen zonder schade aan te richten. En dat is precies



Figuur 1. Het schema van deze versie van de magnetische levitatie-schakeling.



Figuur 2. Een gewone instelpotmeter plus een seriële weerstand passen ook in de behuizing.



Figuur 3. Het demonteren van het relais en voorbereiden van de relaisspoel.

wat we hier willen, de kap intact houden om te worden hergebruikt als behuizing voor de complete elektronica van deze levitatie-schakeling. Net als bij de relais die in de eerdere publicaties zijn gebruikt, moet de U-vorm van de kern van de solenoïde worden veranderd in een I-vorm om een magnetische kortsluiting te voorkomen. Dit is vrij eenvoudig omdat de ronde kern en het rechthoekige platte verlengstuk slechts aan elkaar zijn vastgeklonken. Deze verbinding kan worden verwijderd met een kleine slijpschijf, een freeskop of een boormachine.

Tenslotte kunt u de ijzeren kern eruit halen – als hij er niet vanzelf uitvalt – en omdraaien om een iets groter en ook vlak pooloppervlak te krijgen waarop de Hall-sensor wordt gelijmd, zoals te zien is in **figuur 4**. De elektromagneet en de Hall-sensor kunnen in ieder geval in de behuizing van het relais worden gemonteerd, waar ze goed beschermd zijn tegen de (permanente) magneet.

Het stroomverbruik met een magnetisch voorwerp zwevend onder de spoel bedraagt slechts 50 mA bij een spanning van 5 V, en maximaal 90 mA wanneer de spoel permanent gevoed wordt (bijvoorbeeld wanneer er geen magneet in de buurt van de kern is).

Het ombouwen van het Finder-relais zorgt voor een zeer goede elektromagneet en – met kap – zelfs voor een goede mechanische bescherming van de hele schakeling zodat permanente magneten de kern en/of de Hall-sensor niet kunnen raken. Als u het echt zo klein in de relaisbehuizing wilt inbouwen – zoals ik heb gedaan – dan kost dat niet al te veel moeite. Het zal wat tijd kosten om uit te zoeken hoe alle componenten in dit relatief kleine volume passen. Maar de schakeling kan natuurlijk ook heel gemakkelijk op breadboard of gaatjesprint worden gebouwd (**figuur 5**), en er zijn slechts vier draden nodig om de combinatie van spoel, LED, weerstand en Hall-sensor met de rest van de schakeling te verbinden. Een 20 cm lang stuk platte lintkabel kwam mij voor dit doel bij een prototype zeer goed van pas.

Goede ingenieur of moedige maar roekeloze knutselaar?

Luc van het Elektor-lab heeft kritisch, maar absoluut correct, opgemerkt dat de uitgang van de LM311 50 mA kan opnemen. Maar hoe zit het dan met die 90 mA? Welnu, die vraag is correct. Maar mijn doel was om de schakeling zo eenvoudig mogelijk te houden en het aantal componenten tot een absoluut minimum te beperken. En dus wilde de knutselaar in mij niet zomaar een extra driver-transistor gebruiken om te voorkomen dat mijn schakeling voortijdig komt te overlijden.

Nadere bestudering van de interne schakeling van de LM311 (**figuur 6**) en schema's in de datasheet onthulden dat de chip een intern beveiligingscircuit heeft dat de uitgangsstroom tot een onschadelijk niveau beperkt, zelfs in geval van kortgesloten uitgang, resulterend in een maximale vermogensdissipatie van 350 mW bij 5 V voedingsspanning. Dit maakt de uitgang bijna onverwoestbaar – of op zijn minst niet erg kwetsbaar voor een laagohmige belasting. Tot slot heb ik mijn schakeling twee dagen aan laten staan, en zoals ik verwacht en gehoopt had, overleefde hij het!

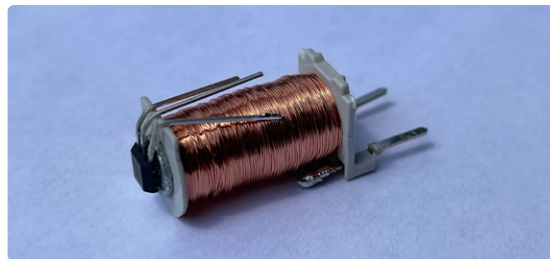
OK, laten we een stapje terug doen. Ik respecteer de maximumsnelheid, ik betaal mijn belastingen, en ik lees en houd me aan datasheets – en ik ken veel goede redenen om binnen de *safe operating area* (SOA) van halfgeleiders te blijven. Zelfs als geïntegreerde schakelingen allerlei beschermingscircuits hebben, is het een slechte gewoonte om tot hun grenzen te gaan. Het zal de levensduur van de chips beslist verkorten. U kunt aanvoeren dat die – in dit geval – lang genoeg is en dat het vervangen van een LM311 geen fortuin kost, maar met deze compacte constructie zal het een hele klus zijn om de schakeling te repareren. Veiligheid voor alles, maar het was voor mij een uitdaging om te proberen of de schakeling ook met een kleinere uitgangsstroom kan werken. Een gemakkelijke en voor de hand liggende manier om dit te bereiken is

om het 5V-Finder-relais (40.52.7005.0000) met zijn 50Ω-spoelweerstand te vervangen door een 6V-relais met 75 Ω (Finder 40.52.7006.0000), maar zo'n relais had ik niet.

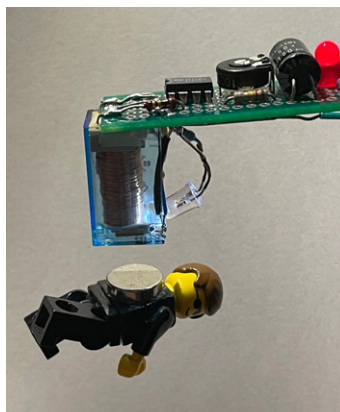
Ik heb dus de op één na beste oplossing gekozen: met behoud van de 5V-voeding heb ik de spanning over de spoel verlaagd door twee 1N4148-diodes in serie te plaatsen tussen de voeding en de solenoïde (figuur 7). Dit reduceerde de spoelstroom zonder belasting tot 50 mA en met belasting tot een gemiddelde van 39 mA. Een enkele weerstand van 22 Ω heeft hetzelfde effect. En dat werkt ook goed! Dit houdt de comparator binnen zijn elektrische specificaties. Helaas vermindert deze vermogensreductie ook de afstand tussen de elektromagneet en het zwevende voorwerp. Wat erger is, het regelsysteem heeft minder marge om verstoringen op te vangen. Met andere woorden, bij dit lagere vermogensniveau zal het zwevende voorwerp naar beneden vallen of de elektromagneet raken als het ook maar een klein beetje afwijkt van de ingestelde afstand tot de kern. De schakeling is minder goed in staat dit te corrigeren.

Ontwerpideeën?

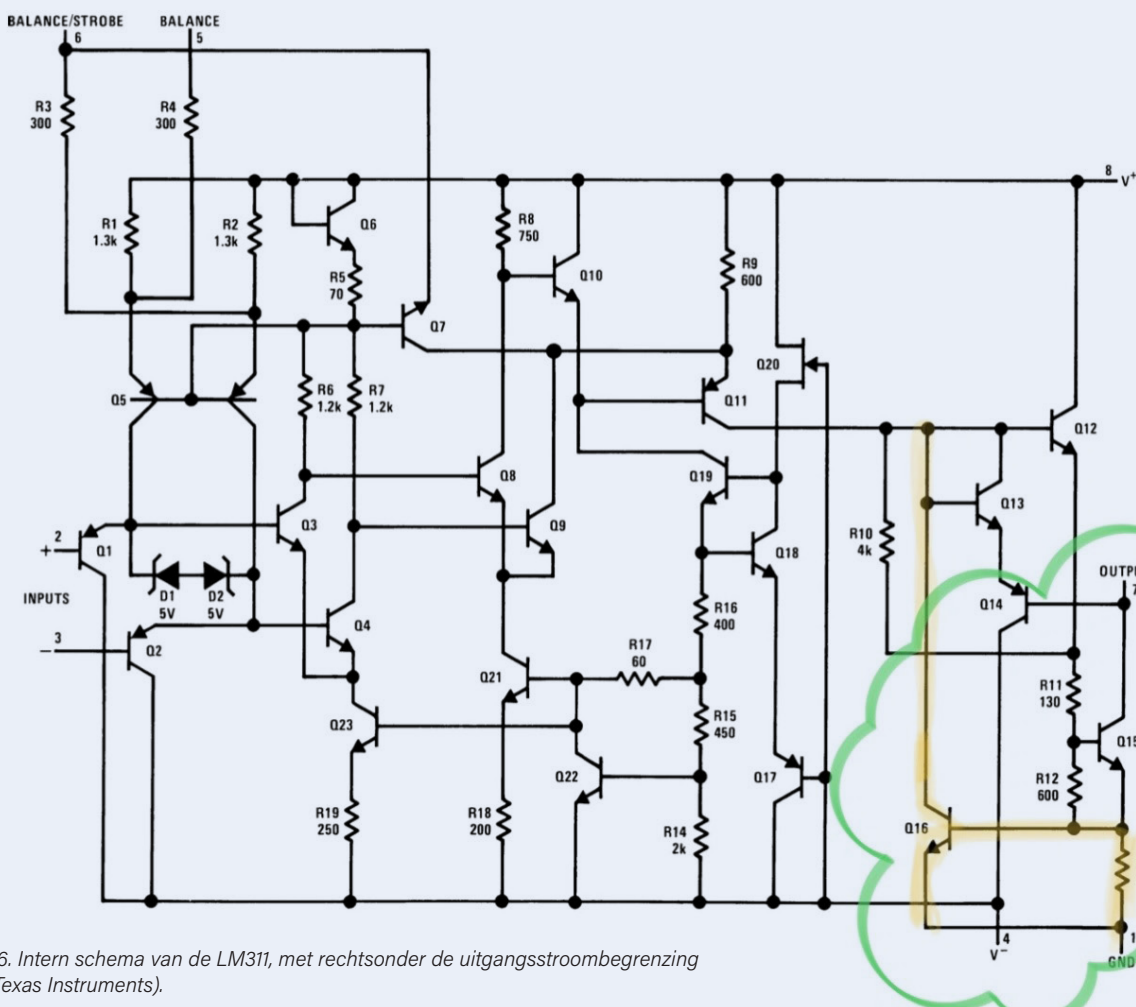
Al met al vind ik deze kleinere installatie fraaier dan de eerste analoge versie die ik op gaatjesprint bouwde voor deel I. Hij ziet er mooier uit,



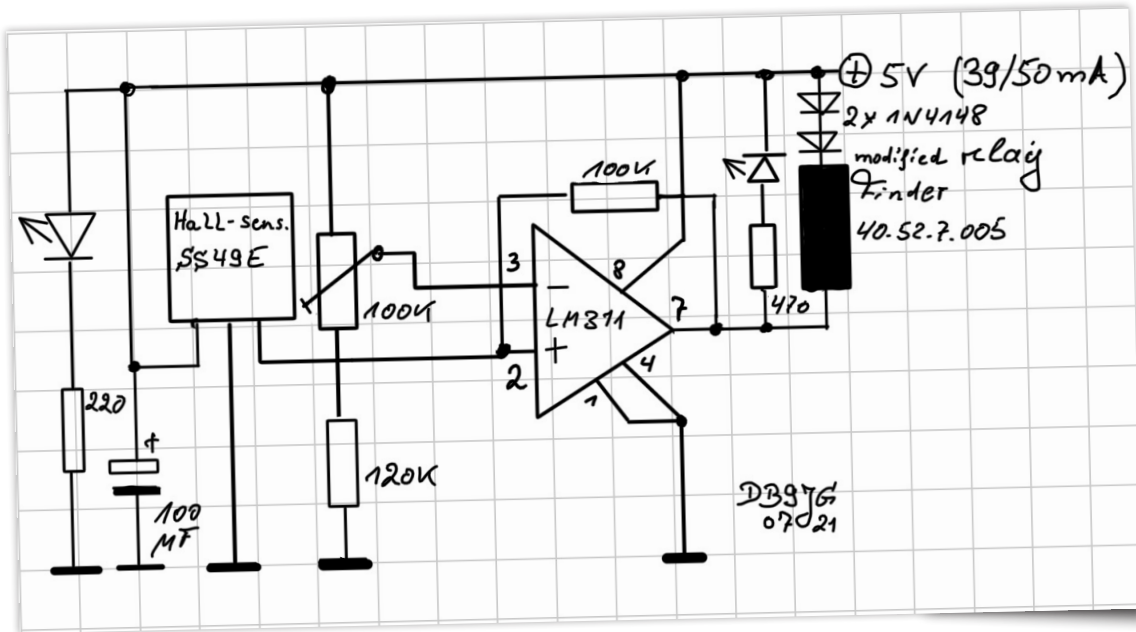
Figuur 4. De Hall-sensor vastgelijmd op de ijzeren spoelkern.



Figuur 5. De schakeling kan ook op een stuk gaatjesprint worden gebouwd.



Figuur 6. Intern schema van de LM311, met rechtsonder de uitgangsstroombegrenzing (bron: Texas Instruments).



Figuur 7. De magnetische levitatie-schakeling met twee 1N4148-diodes om de stroom door de spoel te begrenzen.

en de elektronica is beter beschermd door de behuizing van het relais. De tweede versie – met een op ESP32 gebaseerde M5Stack Atom – liet zien dat de analoge comparator kon worden vervangen door een microcontroller en een eenvoudig algoritme. Naar mijn mening hebben de verschillende varianten van dit kleine project, met zijn eigenlijk zeer algemene regeltechnische probleem, aangetoond dat een analoog ontwerp nog steeds voordelen heeft, zelfs in de huidige, door microcontrollers gedomineerde tijden!

Zoals ik aan het begin van dit artikel al aankondigde, is dit de laatste versie van mijn magnetische levitatieprojecten, tenzij... Misschien hebt u ideeën of suggesties hoe ik het ontwerp nog verder kan verbeteren? ➡

210398-03

Vragen of opmerkingen?

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

Een bijdrage van

Ontwerp en tekst: Peter Neufeld

Redactie: Luc Lemmens

Illustraties: Peter Neufeld, Patrick Wielders, Luc Lemmens

Vertaling: Jan Mulder

Layout: Harmen Heida



ONDERDELENLIJST

Weerstanden:

R1 = 100 k

R2 = 470 Ω

R3 = 220 Ω

R4 = 120 k

P1 = 100 k instelpotmeter

Condensatoren:

C1 = 1...100 μF, 16 V radiaal

Halfgeleiders:

LED1, LED2 = LED groen

IC1 = Hall-sensor SS49E

IC2 = comparator LM311

Diversen:

L1 = 5V-relais, Finder

40.52.7.005.0000 (zie tekst)



GERELATEERDE PRODUCTEN

- > Velleman Helping Hand with Magnifier, LED Light and Soldering Stand (SKU 19864) www.elektor.nl/19864
- > Velleman VTSS220 Temperature-Controlled Soldering Station (SKU 19865) www.elektor.nl/19865

WEBLINKS

- [1] Magnetische levitatie "the easy way," Elektor juli/augustus 2021: www.elektormagazine.nl/articles/magnetische-levitatie-the-easy-way
- [2] Magnetische levitatie op de digitale manier, Elektor september/oktober 2021: www.elektormagazine.nl/articles/magnetische-levitatie-op-de-digitale-manier
- [3] Datasheet LM311-comparator: www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311-n.pdf