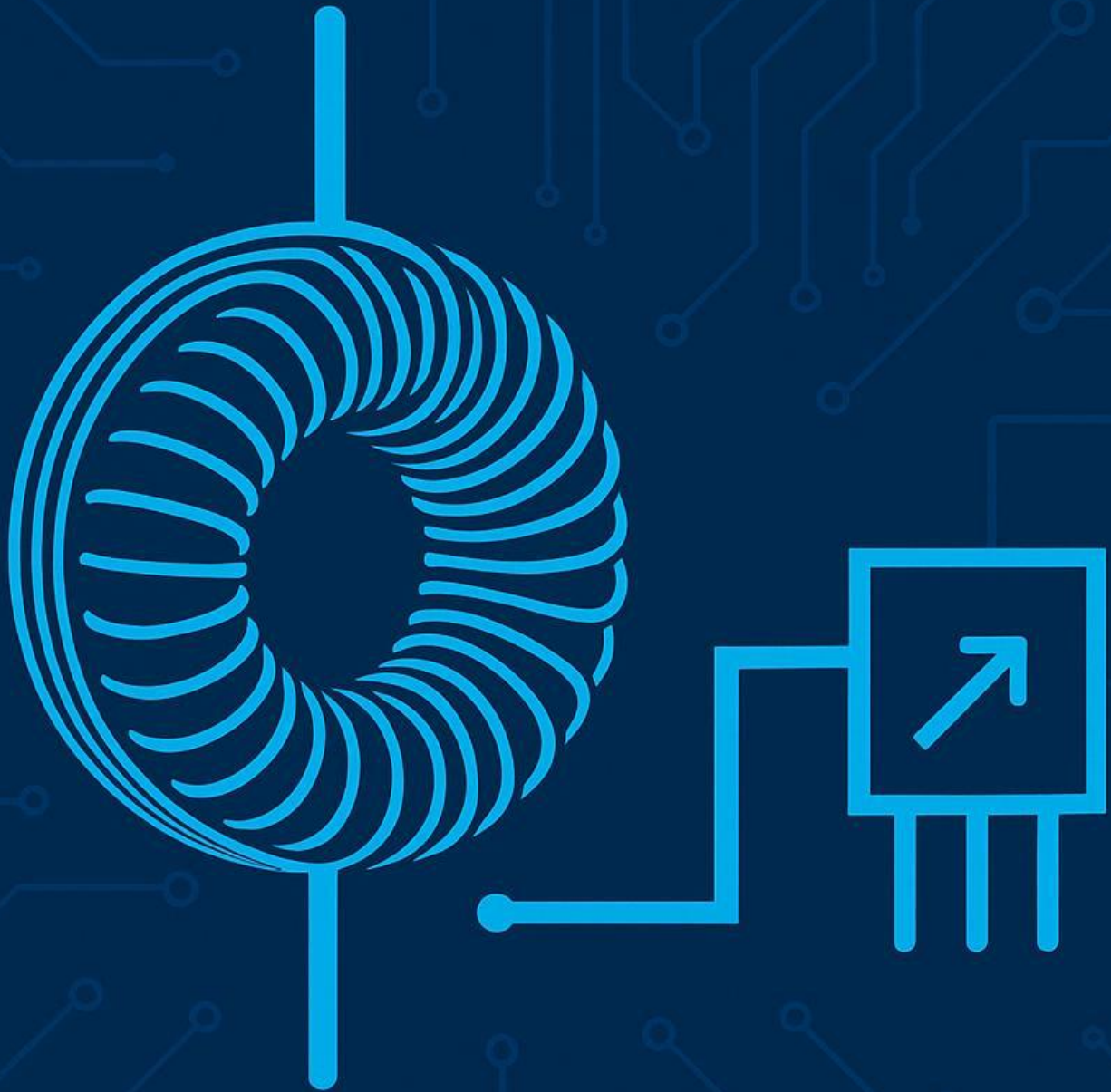


# From Slow To Flow

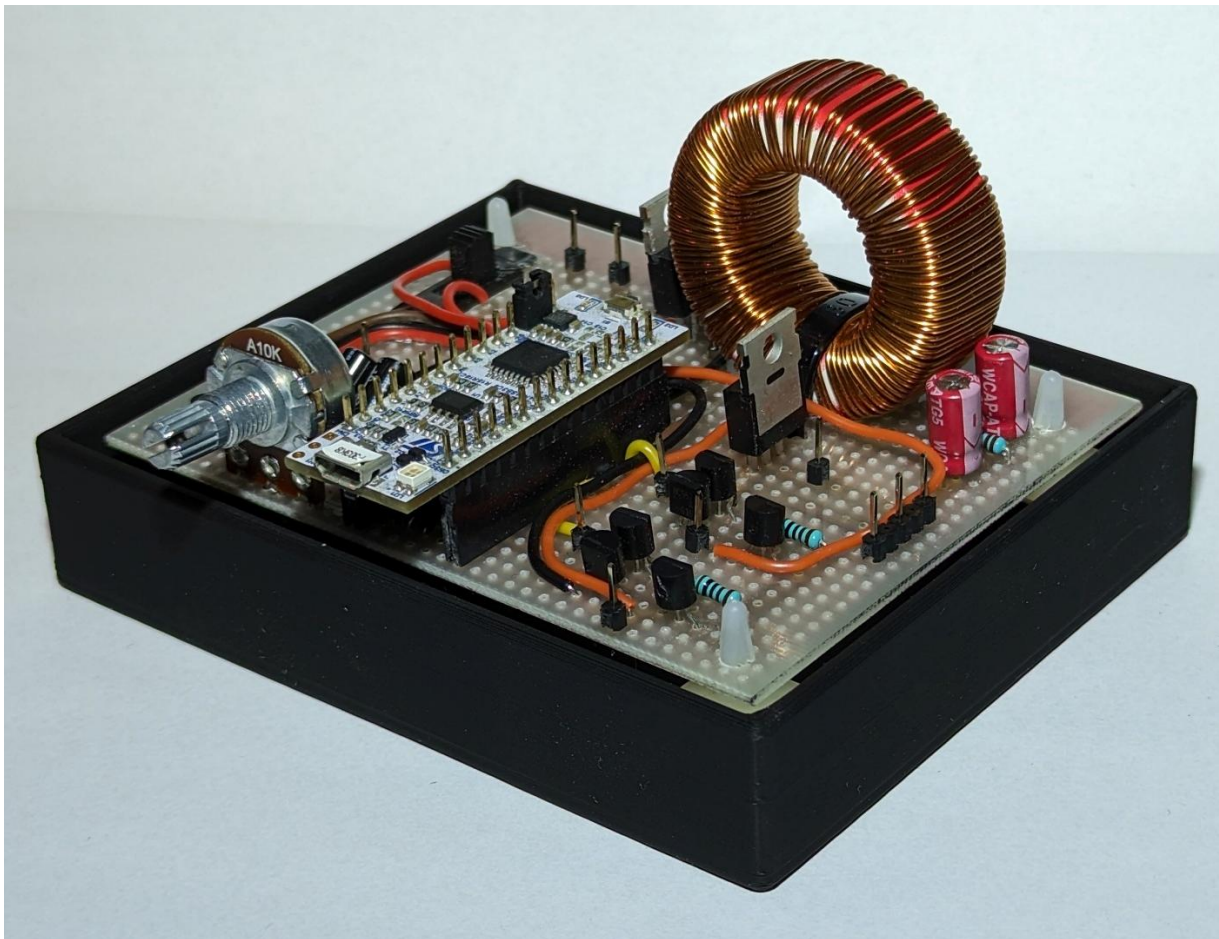


Ivo van der Harst  
&  
Bram Koole

## Robuuste Buck Converter

Een buck converter is een schakelende voeding die een hogere gelijkspanning omzet naar een lagere stabiele uitgangsspanning. Bij snel schakelende toepassingen kan er echter ongewenst ringing optreden: het oscillerend natrillen van de spanning mede door parasitaire inducties en capaciteiten. Dit leidt tot overshoot, langere opstarttijden, elektromagnetische interferentie (EMI) en verhoogde componentbelasting.

Om dit fenomeen inzichtelijk te maken ontwikkelden eerdere studenten een simulatiebox die ringing duidelijk zichtbaar maakt op de oscilloscoop. Deze simulatiebox was echter slechts beperkt bruikbaar als buck converter. In dit project is het doel om deze schakeling te optimaliseren tot een robuuste, snelle en stabiele buck converter.



*Figuur 1: simulatiebox voor ringing fenomeen*

## Inhoud

Robuuste Buck Converter .....	2
Inhoud .....	3
Doelstelling en eisen .....	4
Doelstelling .....	4
Eisen .....	4
Probleemstelling .....	5
Oplossing.....	8
Hardware ontwerp.....	10
PCB.....	10
BOM .....	12
Aanbevelingen .....	13
Bibliografie.....	14

# Doelstelling en eisen

## Doelstelling

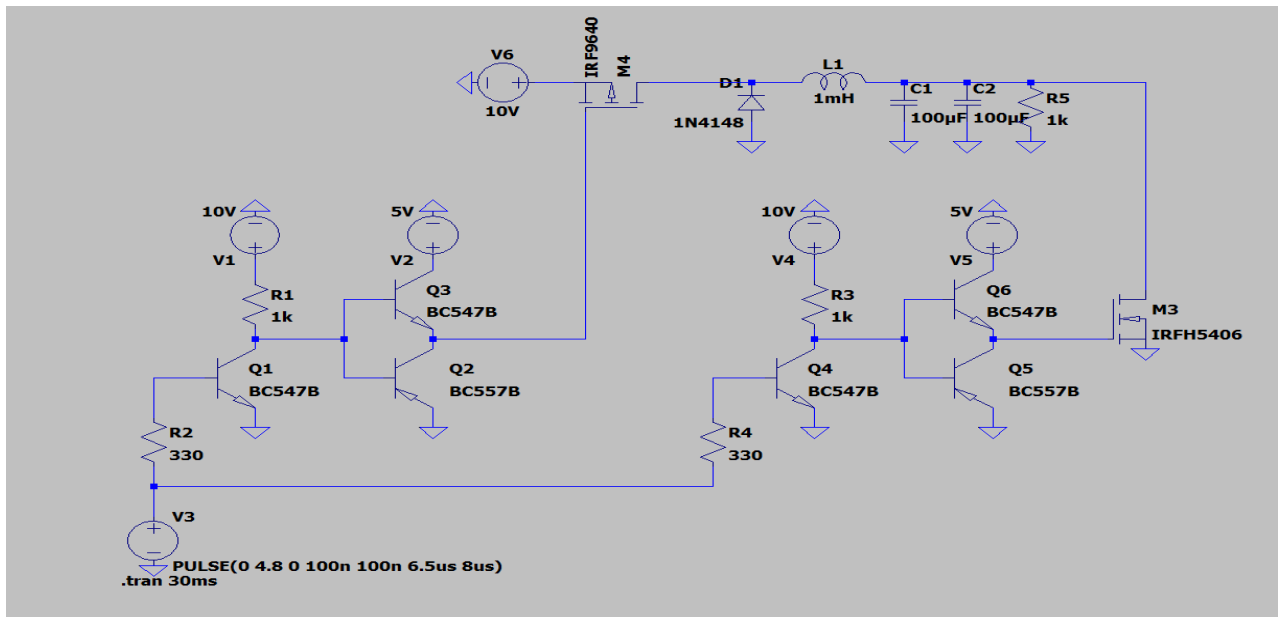
Het doel van dit project is het optimaliseren van een buck-converter, waarmee snel geschakeld kan worden en waar tegelijkertijd duidelijk mee aangetoond kan worden hoe ringing en overshoot beperkt kan worden.

## Eisen

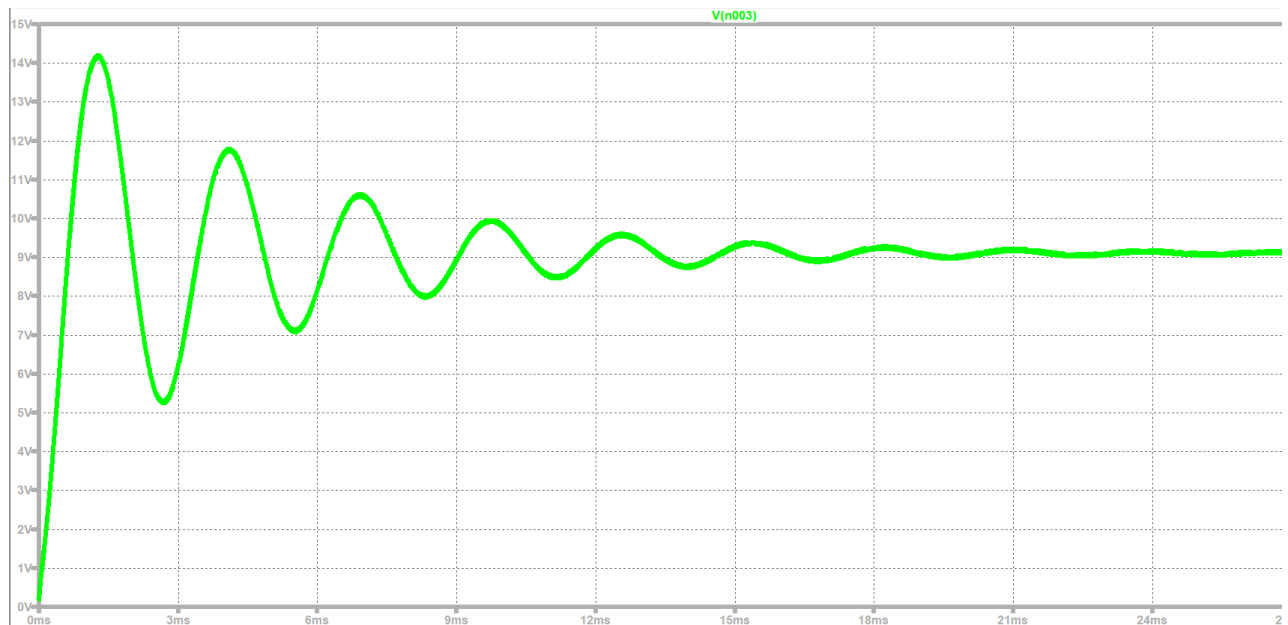
- a. De opschakeltijd van de converter moet minstens een factor 10 kleiner worden.
- b. De converter moet een buck-converter blijven, met dezelfde spanningsniveau's.
- c. De converter moet makkelijk aanpasbaar zijn; dit betekent dat het mogelijk is om makkelijk van component te kunnen wisselen.
- d. De converter moet makkelijk in gebruik zijn; dit betekent dat het inzichtelijk moet zijn wat welke componenten doen en wat hun invloed is.
- e. De converter is robuust; dit betekent dat de converter op een PCB gebouwd zal worden.

# Probleemstelling

Hieronder is de huidige situatie van de simulatiebox te zien en het resultaat wat deze zal opleveren.



Figuur 2: Schematische schakeling van de originele buck-converter



Figuur 3: Output van de originele buck-converter (simulatie met LT-SPICE)

De simulatiebox geeft de volgende outputs:

- Overshoot van circa 4V
- Opstarttijd van circa 30ms

Deze gegevens zijn niet wenselijk voor een snel schakelende toepassing. Er treedt duidelijk ringing op, wat voor het voorgaande project juist goed was, is het nu de bedoeling om dit zo veel mogelijk te beperken. Hierbij is een korte opstarttijd en minimale overshoot het doel.

De schakeling is dus een buck-converter die is opgebouwd met een half-bridge configuratie. Belangrijke componenten in een buck converter zijn de schakeltransistoren, die vaak worden aangeduid als high side en low side, afhankelijk van hun positie in het circuit.

#### High Side:

De high side verwijst naar de schakeltransistor die tussen de ingangsspanning ( $V_{in}$ ) en de belastingszijde wordt geplaatst. Deze transistor regelt de stroom van de ingang naar de inductor en het laadcircuit. Wanneer de high side transistor gesloten is, stroomt er energie van de voedingsbron naar de uitgang en wordt de inductor opgeladen.

#### Low Side:

De low side transistor bevindt zich tussen de spoel en de massa (GND). Wanneer de high side transistor open gaat, wordt de low side transistor meestal geleid om de inductorstroom te laten circuleren. Dit zorgt voor continuïteit van de stroom naar de belasting en voorkomt dat de spanning instabiel wordt.

Hierbij wordt de high side gevormd door een P-MOSFET en de low side door een N-MOSFET. Voor de aansturing van deze schakelaars zijn transistortrappen gebruikt die bestaan uit BC547- en BC557-transistoren. Deze trappen zetten een logica-niveau signaal om naar de hogere spanning die nodig is om de gates van de MOSFET's te schakelen.

Een eerste knelpunt in deze aanpak is dat de bipolaire transistoren slechts een beperkte stroom kunnen leveren aan de MOSFET-gates. Omdat de gates een aanzienlijke capaciteit hebben, resulteert dit in relatief trage ontlaadprocessen. Dit betekent dat de MOSFET's langere tijd in hun lineaire gebied blijven tijdens het schakelen. Het gevolg is dat er meer schakelverliezen optreden en de efficiëntie daalt.

Door transistors te gebruiken met een hogere overgangsfrequentie (ft) kan de gate sneller geladen en ontladen worden. Dit verkort de tijd dat de MOSFET's in hun lineaire gebied zitten en vermindert overshoot en schakelverliezen. Voorbeelden:

1. 2N2369 / 2N3906
  - Type: NPN / PNP
  - Kenmerken:  $f_t \sim 300\text{--}500$  MHz, lage capacitantie, goed beschikbaar.
  - Toepassing: Snelle transitions, geschikt voor hoge-frequentie schakelingen en level-shifting toepassingen waar snelheid belangrijk is.
2. BC817 / BC807
  - Type: NPN / PNP
  - Kenmerken: Hoger  $f_t$  ( $\sim 100\text{--}150$  MHz), snellere schakeling dan BC547/BC557, goede vervanger voor algemene low-power level-shifters.
  - Toepassing: Veel hogere schakelsnelheid en geschikt voor snellere PWM- of MOSFET-gate sturing.
3. SMD-varianten zoals S8050 / S8550
  - Type: NPN / PNP
  - Kenmerken: Hoger  $f_t$  (150–200 MHz), klein pakket (SOT-23), lage switching verliezen.
  - Toepassing: Ideaal voor compacte, snelle schakelingen met hogere frequenties en efficiëntere schakeling dan klassieke doorsteektransistors.

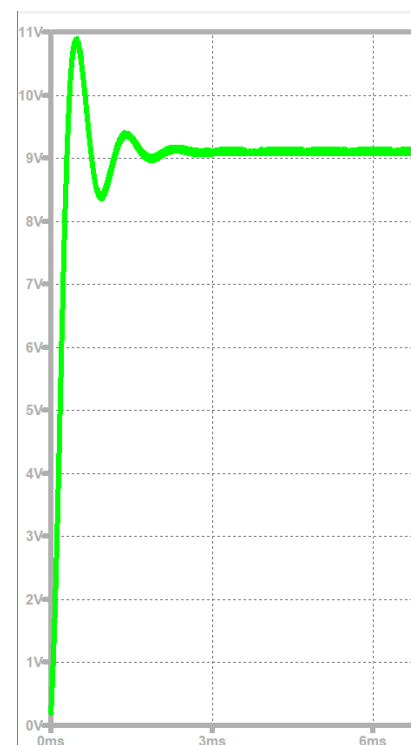
Naast de transistoren kan ook de keuze van de MOSFET de performance verbeteren. Voor hoge-efficiënte, snelle buck-converters zijn MOSFETs met lage gate-capacitantie en lage  $R_{ds(on)}$  cruciaal.

- High-side (P-channel): Kies een P-MOSFET met lage  $R_{ds(on)}$  en lage gate-capacitantie, bijvoorbeeld Si1013 of IRF9Z34N.
- Low-side (N-channel): Kies een N-MOSFET die hoge pulsstromen kan verwerken met lage gate-lading, bijvoorbeeld 2N2007 of IRFZ44N voor hogere stroomtoepassingen.

Bij het verhogen van de schakelsnelheid van de high-side MOSFET, door een type met een lagere  $R_{ds(on)}$  te kiezen, schakelt de MOSFET sneller en vermindert de overshoot. Hierbij moet echter rekening worden gehouden met het feit dat een MOSFET met lagere  $R_{ds(on)}$  vaak een lagere maximale stroom kan verdragen dan een echte power-MOSFET, waardoor er een afweging gemaakt moet worden tussen snelheid en stroomcapaciteit. Voor deze toepassing houden we de stroom laag, deze kan eventueel nog verlaagd worden door een serieweerstand aan de gate van de MOSFET van de high side te plaatsen, om oververhitting of beschadiging te voorkomen.

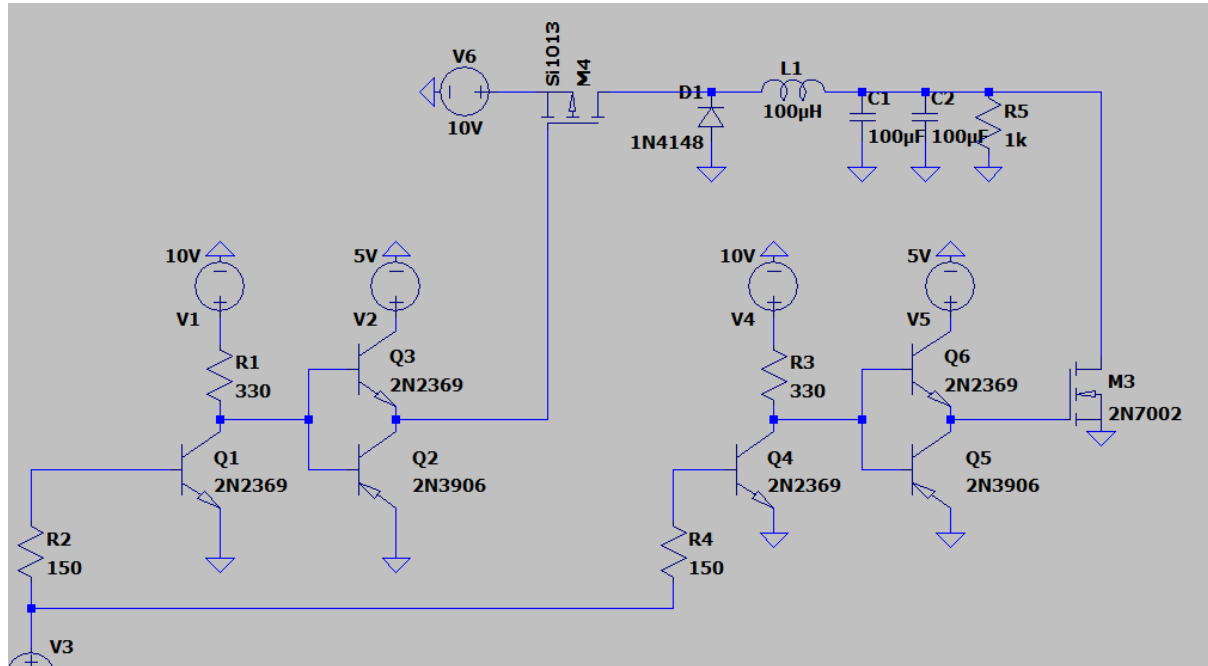
Een ander belangrijk aandachtspunt is de gebruikte spoel. In de schakeling is een waarde van 1 mH toegepast. Voor de gekozen schakelfrequentie is dit relatief groot, waardoor de stroom in de spoel zich traag op- en afbouwt. Dit heeft direct invloed op de opstarttijd van de uitgangsspanning, die daardoor aanzienlijk langer wordt. Bovendien kan de grote spoel bijdragen aan het ontstaan van langdurige ringing, omdat de energie die in het LC-netwerk wordt opgeslagen maar langzaam wordt gedissipeerd.

Samenvattend kan worden gesteld dat de schakeling in zijn huidige vorm functioneel is, maar dat er duidelijke beperkingen optreden zoals de schakelsnelheid, de efficiëntie en het dynamisch gedrag. Deze beperkingen zijn hoofdzakelijk te herleiden uit de eigenschappen van de gebruikte P-MOSFET en de relatief grote waarde van de spoel.

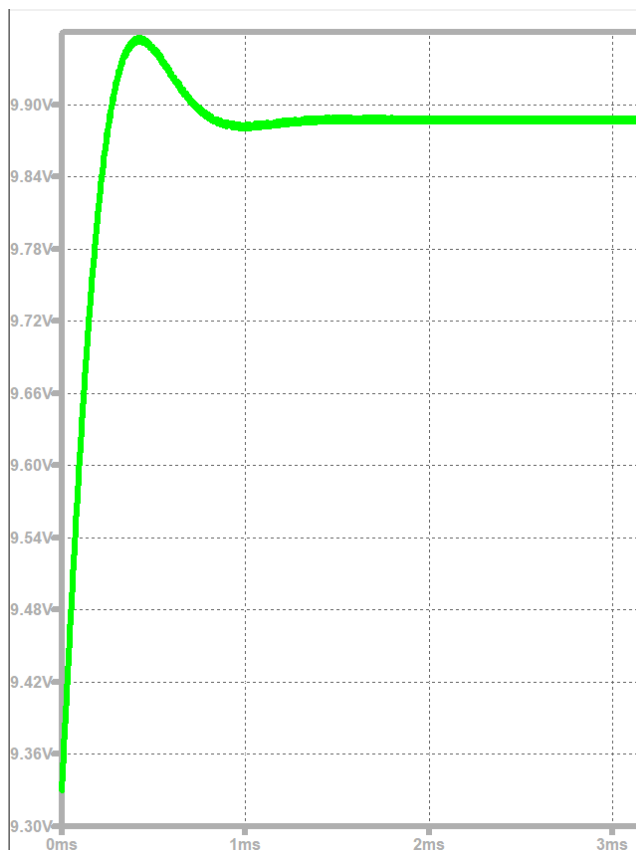




### Toepassen van verbeterde BJT's + MOSFET low side en high side:



Resultaat:



- Inschakeltijd is nu  $\pm 2\text{ms}$
- Overshoot is nu  $\pm 60\text{mV}$

# Hardware ontwerp

## PCB

Voor het ontwerp van het pcb is het volgende bedacht. Er wordt gebruik gemaakt van een F303K8 voor het maken van een signaal voor de converter. Aan de hand van de stand van de potmeter wordt dit signaal aangepast waardoor de uitgangsspanning veranderd. Daarnaast wordt er een aan-uitschakelaars gebruikt en twee schakelaars om van transistor te wisselen. Er kunnen twee verschillende transistoren worden gemonteerd die door middel van schakelaars kunnen worden geselecteerd. Zie de volgende pagina voor de tekeningen.

### Pinnen

P1 t/m P3:

Deze pinnen zijn ervoor om de PCB te voorzien van voeding. Omdat de F303K8 geen 10V kan leveren moeten P1 en P3 altijd aangesloten worden op een externe voeding. De voeding voor P2 is optioneel omdat het ook mogelijk is om de interne voeding van de F303K8 te gebruiken voor 5V. Deze voeding is nodig om de transistoren van de levelshifters te voorzien van 5V.

P4:

Op deze pinnen is het mogelijk om de uitgangsspanning te meten van de buck-converter.

P5 & P7:

Op deze pinnen is het mogelijk om het ingangssignaal te meten van de levelshifters.

P6 & P8:

Op deze pinnen is het mogelijk om het uitgangssignaal te meten van de levelshifters.

P9:

Deze pin kan gebruikt worden om metingen te doen aan de programmeerbare IC.

### Schakelaars

S1 & S2:

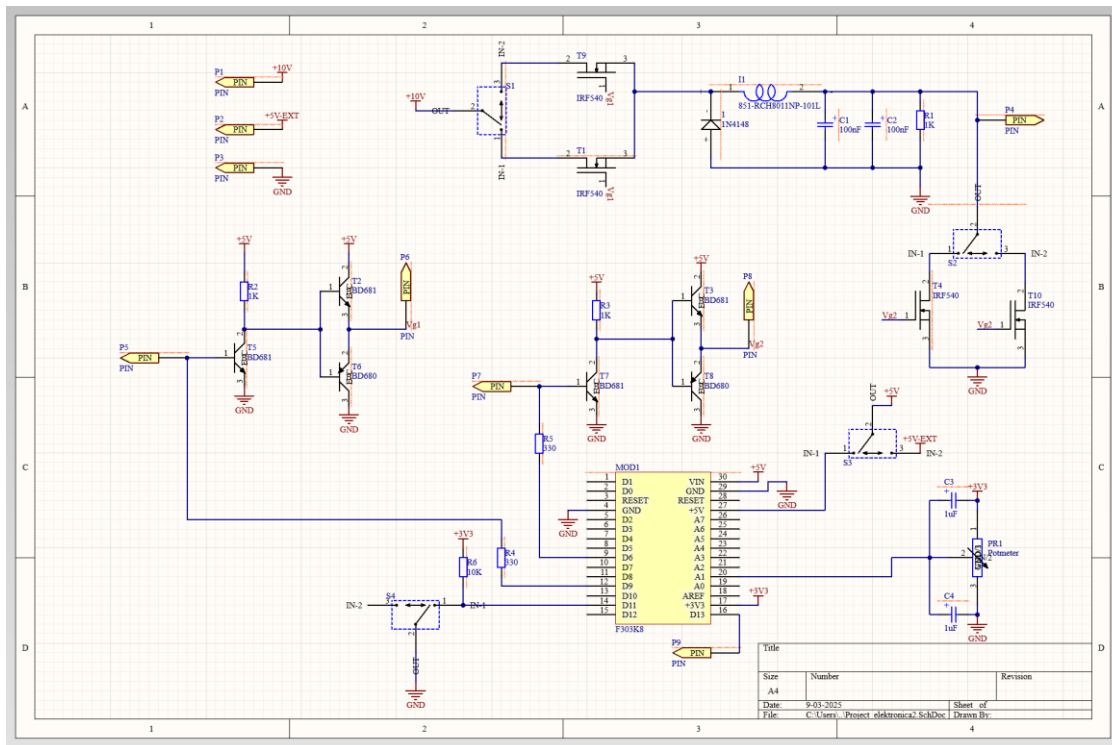
Deze schakelaars zorgen ervoor dat er gekozen kan worden tussen twee verschillende transistoren die de buck-converter aansturen (T1,T9 & T4,T10). Hierdoor kan er makkelijk een verschillen gemeten worden voor verschillende soorten transistoren. Hierin moeten de schakelaars wel altijd dezelfde transistor inschakelen.

S3:

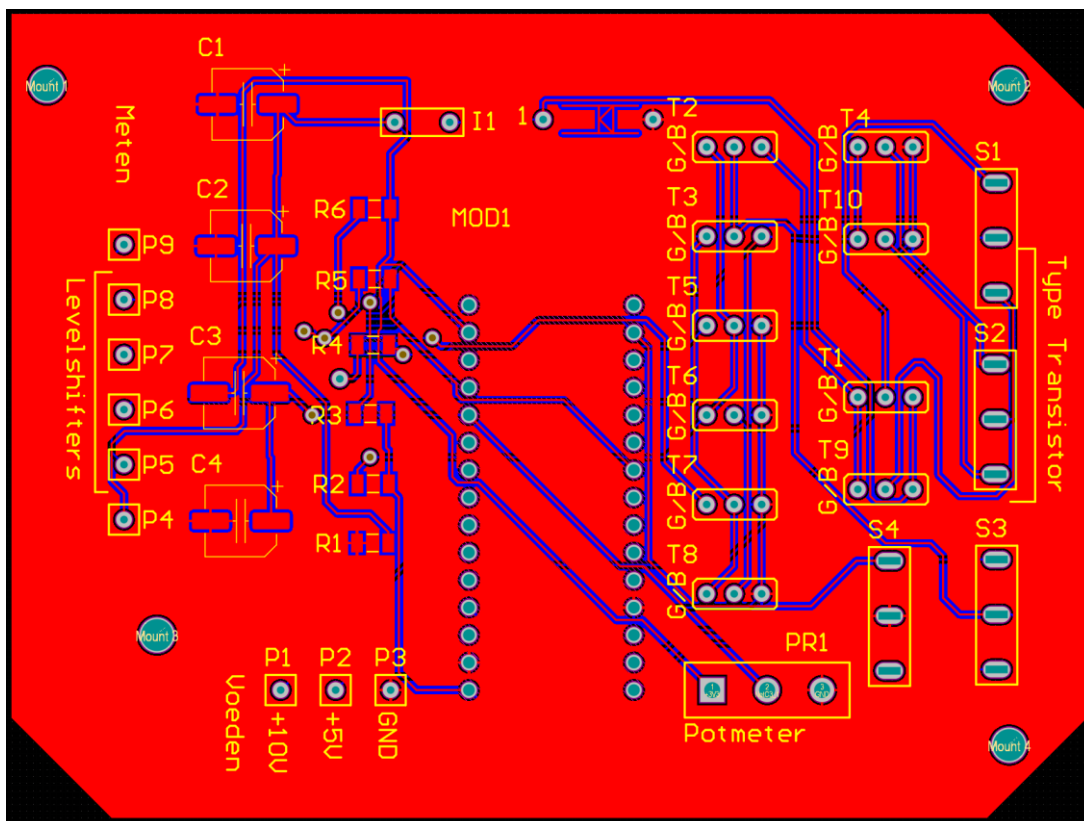
Deze schakelaar is bedoeld om de voeding van geselecteerde componenten op de PCB te veranderen. Hieronder vallen de transistoren voor de levelshifters. Hierbij kan gekozen worden voor een externe voeding van 5V of de interne voeding van de programmeerbare IC.

S4:

Deze schakelaar zorgt ervoor dat de code op programmeerbare IC, in dit geval de F303K8, in te schakelen waardoor het circuit zijn werk gaat doen. Dit houdt in dat de alle transistoren de juiste signalen krijgen aan de hand van de stand van de potmeter. Hierdoor kan er dus een spanning gemeten worden bij pin P4.



Figuur 4, Elektrisch schema van de PCB



Figuur 5, PCB in Altium Designer

## BOM

Soort	Beschrijving	Indicator	Hoeveelheid
Diode	1N4148 Diode	D1	1
Condensator	100nF Elco SMD 6.3mm	C1, C2	2
Condensator	1uF Elco SMD 6.3mm	C3, C4	2
Spoel	100uH 851-RCH8011NP- 101L	L1	1
Programmable IC	F303K8	MOD1	1
Potmeter		PR1	1
PIN		P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9	9
Weerstand	1K SMD Resistor 1206	R1, R2, R3	3
Weerstand	330 SMD Resistor 1206	R4, R5	2
Weerstand	10K SMD Resistor 1206	R6	1
Schakelaar	3 pin	S1, S2, S3, S4	4
NPN MOSFET	IRF540	T1, T4, T9, T10	4
NPN BJT TH	BD681	T2, T3, T5, T7	4
PNP BJT TH	BD680	T6, T8	2



Figuur 7, Potmeter



Figuur 6, 3-pins schakelaar

## Aanbevelingen

In het huidige project is gebruikgemaakt van een P-channel MOSFET op de high side en een N-channel MOSFET op de low side, aangestuurd via level shifters. Hoewel deze opzet functioneel is, biedt het gebruik van een N-channel MOSFET op de high side potentieel aanzienlijke voordelen, met name op het gebied van schakelsnelheid en efficiëntie.

Een directe vervanging van de P-channel high side door een N-channel MOSFET is niet mogelijk zonder extra aansturing, omdat een N-channel MOSFET volledig opent wanneer de gate-spanning hoger is dan de bron. Bij een high side MOSFET is de bron verbonden met de inputspanning, waardoor de gate-spanning boven de inputspanning moet liggen om volledig geleiding te bereiken.

Dit kan wel bereikt worden met bootstrapping. Hierbij wordt een kleine condensator en een diode gebruikt om tijdens de off-fase van de high side MOSFET spanning op te bouwen. Deze condensator wordt opgeladen tot ongeveer de inputspanning wanneer de low side MOSFET geleidt. Zodra de high side MOSFET moet schakelen, levert de condensator de extra spanning boven de inputspanning die nodig is om de gate van de N-channel MOSFET volledig te openen. Hierdoor kan de N-channel high side MOSFET snel en efficiënt schakelen, zonder dat een complexe externe voedingsspanning nodig is.

Het gebruik van een N-channel high side MOSFET met bootstrap heeft meerdere voordelen ten opzichte van de huidige P-channel configuratie:

1. Lagere  $R_{ds(on)}$ : N-channel MOSFETs hebben doorgaans een lagere drain-source weerstand bij dezelfde stroomcapaciteit, wat resulteert in minder verliezen en hogere efficiëntie.
2. Snellere schakeltijden: N-channel MOSFETs hebben over het algemeen lagere gate-ladingen per gegeven  $R_{ds(on)}$ , waardoor ze sneller kunnen schakelen en snellere transient-respons mogelijk maken.
3. Verbeterde thermische prestaties: Door de lagere verliezen wordt minder warmte gegenereerd, waardoor het thermisch beheer vereenvoudigd wordt.
4. Kleinere footprint en kostenefficiëntie: Voor dezelfde stroomcapaciteit kan een N-channel MOSFET vaak kleiner en goedkoper zijn dan een P-channel alternatief.

Voor een vervolgonderzoek wordt aanbevolen om te experimenteren met een N-channel high side MOSFET met bootstrap-aandrijving.

## Bibliografie

*bipolar-junction-transistor*. (sd). Opgehaald van <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/bipolar-junction-transistor/>

*buck-converters*. (sd). Opgehaald van <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/buck-converters>

Francis, C. (2016, 03 10). *understanding-charge-storage-semiconductors*. Opgehaald van [www.eeworldonline.com](http://www.eeworldonline.com): <https://www.eeworldonline.com/understanding-charge-storage-semiconductors-faq/>

Heerdt, S. t. (sd). *Project-Buck-Converter*. Opgehaald van <https://github.com/S1146468/Project-Buck-Converter>

*how-to-use-a-logic-level-shifter-circuit-for-components-with-different-voltages*. (sd). Opgehaald van <https://maker.pro/custom/tutorial/how-to-use-a-logic-level-shifter-circuit-for-components-with-different-voltages>

*mosfet*. (sd). Opgehaald van <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/mosfet/>

Shedrack, O. O. (sd). *bootstrap-circuit*. Opgehaald van <https://medium.com/@os.onubi/bootstrap-circuit-bootstrapping-is-a-field-of-electronics-a-technique-where-part-of-the-output-of-6c1f14edd36>

*speed-up-bjt-switching*. (sd). Opgehaald van <https://www.eevblog.com/forum/beginners/speed-up-bjt-switching/>