

## 5. Maak een Meetopstelling Trillingsvrij

De leerdoelen voor vandaag zijn:

- Inzien dat de parameters in een differentiaalvergelijking ontwerpparameters zijn die een ontwerpruimte opspannen.
- Op basis van een differentiaal vergelijking een keuze maken voor parameters en die vervolgens kunnen vertalen in een fysiek ontwerp.

Om die leerdoelen onder de knie te krijgen gaan jullie een opstelling maken die in staat is om een gevoelige meetopstelling te isoleren van trillingen van de buitenwereld. Je gaat dat doen door parametrisch te ontwerpen: we reduceren het ontwerpprobleem tot een gering aantal fysische parameters die we kunnen controleren. Dit notebook helpt je daar stap voor stap doorheen. Je moet meerdere dingen inleveren:

### Voor de lunch (sanity checks, aan je TA laten zien):

- een berekende grafiek die je bij je ontwerp nodig hebt (zie onder)
- laat zien dat je de Arduino werkend aangesloten hebt.

### Voor einde van de dag (ontwerpopdracht)

- Het invul-notebook. Maak een nieuwe branch aan voor deze opdracht. Daarin vind je het invul-notebook. Open dat op één laptop.
- Een video bestand (liefst gif!) met een video die laat zien dat je opstelling 'werkt', op Brightspace
- je samenwerken feedback logboek op Brightspace.

### Groep vormen

Deze opdracht doe je in groepen van 3 studenten. Je kan je groepsnummer en je medestudenten vinden op Brightspace onder Groups: ontwerpopdracht 5: Maak een meetopstelling trillingsvrij. Net als in vorige weken hebben we een invultemplate notebook dat je gedurende de dag bij houdt.

**Als je groep om 11.00 niet compleet is, trek dan aan de bel door je TA erbij te roepen.** Wij komen dan kijken wie er mist en schuiven met studenten in incomplete groepen om jullie in volledige groepen te krijgen.

### Laptops

Net als vorige week werk je met twee laptops en één fysiek notebook. Op een van de notebooks open je de Arduino software en Processing. Op de andere laptop open je het invultemplate notebook. We willen, net als vorige week, geen andere applicaties of websites open zien staan (met uitzondering van de youtube video hieronder).

## Samenwerken

Overleg bij alles wat je in het notebook invult met je team: wat je inlevert, is van jullie alle drie. Je zal dus goed moeten samenwerken. Jullie hebben allemaal als het goed is het hele notebook doorgelezen. Maak nu samen een planning waarin je aangeeft:

- Hoe laat je bij de mijlpalen verwacht te zijn. Als je een mijlpaal niet haalt omdat je vast zit, is het een goed idee om je TA om hulp te vragen.
- Bij opsplitsen: wie welke actie gaat doen en hoe laat die klaar gaan zijn.
- Op welke tijden je als team pauzes neemt. Continu werken is niet effectief.

Vul bij *opdracht 1* in de template de tabel in (en eventueel aan als je meer regels nodig hebt). **Laat de planning aan je TA zien.** De planning moet uiterlijk om **11.00** gezien zijn.

Jullie keuzes in de ontwerpcyclus kunnen betekenen dat je in het template zelf cellen toevoegt of verwijdert aan de template. Dat is prima, zolang je ons maar laat zien welke ontwerpstappen je genomen hebt. Dus niet het notebook aan het einde van de rit invullen, maar gedurende het ontwerpen en maken continue invullen en aanpassen waar nodig. Succes!

## Opsplitsen: Twee taken

Als voorbereiding ga je opsplitsen: één teamlid doet taak 1. Twee teamleden doen taak 2. Zodra je daarmee klaar bent heb je groepsoverleg waar je belangrijke beslissingen samen neemt.

### Taak 1: Sanity check Arduino & Processing software

Bekijk dit filmpje: <https://www.youtube.com/watch?v=VqTxH3CenRw> (link ook op Brightspace) waarin de docent uitlegt hoe je twee acceleratiemeters aansluit op je Arduino en een meting doet. **De docent zegt hierin dat je een video moet maken, dat hoeft niet meer. Deze youtube is uit de corona-tijd, je kan nu aan je TA laten zien dat het werkt! Aan het einde van de dag maak je wel een video van je totale opstelling** Aan het einde moet je aan je groepsgenoten vertellen en bij *opdracht 2a* in het invultemplate invullen:

- hoe makkelijk of moeilijk de setup is om mee te werken.
- hoe lang je verwacht dat het duurt om één meting te doen.
- welke nauwkeurigheid je verwacht te kunnen halen.

### Taak 2: Ontwerp-eis omrekenen naar parameters

De tweede en derde student gaan Het onderstaande tot 'Groepsoverleg' uitwerken bij *opdracht 2b* in de template.

## Analyse: Bepalen parameters

In de analyse fase van ontwerpen gaat het om het uitwerken van de opdracht (of de wensen van de klant binnen een bedrijf) tot criteria waar het ontwerp aan moet voldoen. Dit dient dan als input voor de volgende fase: synthese, waarin je ideeën gaat bedenken. Bij parametrisch ontwerpen gebruik je de analyse fase om te bepalen welke parameters belangrijk zijn, hoe deze

je ontwerp beïnvloeden en tot slot wat de eisen aan deze parameters zijn. Dat gaan we hier ook stap voor stap doen.

De parameters waar je als ontwerper invloed op hebt in dit ontwerp zijn massa ( $m$ ) en veerconstante ( $C$ ). Denk terug aan het college en zie eventueel deze video over theorie op Youtube. De eisen aan het ontwerp zijn dat een trilling van 5 Hz gedempt wordt met een factor 3 en dat deze op het horizontale vlak stabiel is. Reken uit welke kantelfrequentie (ook wel cut-off frequency of Eigen frequency) het massa-veer-systeem, dat je gaat ontwerpen, moet hebben. Schrijf dit op in de template.

Plot vervolgens in de template hoe de amplitude overdracht ( $\left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|$  in het college) voor je berekende kantelfrequentie afhangt van de frequentie van de trilling van de vloer ( $f_0$ ). Zorg dat de x-as uitgedrukt is in Hz en plot beide assen op een logaritmische schaal. Dit soort grafieken heten 'Bode plots' en heb je al een keer gezien/of krijg je binnenkort bij het vak vector en Fourier analyse.

In het college hebben we laten zien dat je een gegeven kantelfrequentie ook kan omrekenen tot een  $\Delta x$ , het verschil in lengte van de veer tussen de situaties wanneer je de massa er volledig afhaalt en wanneer je deze terug zet. Bereken in het template wat de minimale  $\Delta x$  is die je nodig hebt om aan de ontwerpeis te voldoen.

De berekende  $\Delta x$  is het grensgeval waar je opstelling net aan de eisen voldoet. Echter, als je gaat bouwen heb je te maken met onnauwkeurigheden in je constructie: is bijvoorbeeld  $\Delta x$  wel precies gemeten? Verder is de formule die we gebruiken een benadering: zo verwaarlozen we het effect van damping. Het is dus handig om in je ontwerp te mikken op een veiligere  $\Delta x$  dan precies op de grens van de eis.

Plot bij opdracht 3 in de template een grafiek voor de door jou berekende  $\Delta x$  waar je massa op de x-as en veerconstante op de y-as zet. Zet in dezelfde grafiek ook lijnen die horen bij een twee keer zo grote en vijf keer zo grote  $\Delta x$ . Zorg voor goede labels bij de verschillende lijnen.

**Laat je grafiek aan je TA zien."**

In jullie plot kan je zelf zien wat je moet doen om een hogere  $\Delta x$  te bereiken en zo dus een lagere kantelfrequentie en dus een lagere amplitude overdracht bij een gegeven verstoringfrequentie te halen. Je kan twee dingen veranderen om je  $\Delta x$  te verhogen. Geef die aan bij opdracht 4 in de template.

## Schattend rekenen

Nu jullie de veerconstante van jullie veer bepaald hebben, gaan we de Youngs-modulus schatten van deze veer. De Youngs-modulus (ook wel elasticiteitsmodulus genoemd) is een materiaaleigenschap die aangeeft hoe stijf het materiaal is onder uitrekking/indrukking ervan. De Youngs-modulus is afhankelijk van drie parameters: de veerconstante  $C$ , de rustlengte  $L$  en het dwars oppervlak  $A$  (het oppervlak loodrecht op de trek/compressie richting). Hieruit komt de volgende vergelijking voor de Youngs-modulus:

$$E = \frac{CL}{A}$$

De veerconstante hebben jullie zojuist berekend en de rustlengte van de veer hebben jullie ook al bepaald. De oppervlakte van de veer gaan jullie nu schatten volgens de methode die jullie

geleerd hebben in het college van afgelopen maandag (23 maart). Het is nadrukkelijk niet de bedoeling om deze oppervlakte (of de dimensies ervan) te meten. Hiermee kunnen jullie nu de Youngs-modulus bepalen van de veer. Vergelijk dit met wat de daadwerkelijke Youngs-modulus is van het materiaal van jullie veer (voor de meest voorkomende materialen te vinden op de wikipedia pagina van de Youngs-modulus).

**Laat de schatting en het eindresultaat zien aan jullie TA, die tekent dit af!**

## Groepsoverleg en laten zien sanity check

Als je jullie twee taken hebt uitgevoerd kom je als groep samen om te beslissen op welke  $\Delta x$  je gaat mikken in jullie ontwerp. Eerst presenteert je aan elkaar kort je bevindingen van je individuele taak. Daarna neem je als groep een beslissing: op welke  $\Delta x$  ga je mikken in je ontwerp. Noteer hieronder je beslissing en **laat aan je TA zien**:

- Je werkende Arduino opstelling
- de grafiek van  $\Delta x$  die je hierboven gemaakt hebt.

Leg deze keuze vast bij opdracht 4 in de template.

## Synthese

Je weet nu welke  $\Delta x$  je minimaal dient te bereiken. Rekening houdend met de materialen die je voor hande hebt: Maak een schets van je beoogde massa-veer systeem. Denk daarbij aan:

- wat ga je als veer / verend materiaal gebruiken. (dus niet: welke veerconstante, maar: welk fysiek ding ga je als veer / verend materiaal gebruiken?)
- wat ga je als massa gebruiken (dus niet: hoe zwaar is dat ding, maar: welk ding)
- hoe ga je je massa aan je veer bevestigen?

Vervang bij opdracht 5 het TU Delft logo in de template door jullie schets.

## Simulatie

Voordat je je massa-veer systeem gaat bouwen doe je eerst een simulatie: test of je  $\Delta x$  gehaald hebt. Bevestig zo snel en makkelijk mogelijk je massa aan je veer / verend materiaal. **Bouw dus nog niet de hele opstelling, maar test alleen de massa en veer. Dit moet niet meer dan 5 minuten duren.** Wordt de veer met minimaal  $\Delta x$  ingeduwd of uitgerekt? **Laat dit aan je TA zien** voordat je verder gaat met je hele opstelling bouwen!"

## Evaluatie en beslissing

Vul de evaluatie en beslissing in bij opdracht 6 in de template.

## Fabricage

Maak nu het massa-veer systeem dat je ontworpen had. **Laat voordat je gaat meten je opstelling aan je TA zien.** (als je TA druk is, begin met meten, maar zorg wel dat je TA je opstelling

gezien heeft, anders krijg je misschien te laat te horen dat er iets niet in orde is!)

## Evaluatie

Nu gaan jullie meten of het daadwerkelijk gelukt is de amplitude-overdracht die geëist is te behalen.

**Extra sanity check** De metingen kunnen best tijdrovend zijn. Als sanity-check: til je massa op (of duw hem omhoog) totdat je veer / verend materiaal niet meer onder spanning staat. Heb je je beoogde  $\Delta x$  gehaald? Zo niet, ga dan snel je opstelling verbeteren (stappen terug in de ontwerpcyclus) tot dit wel gelukt is. Denk aan de grafiek van veerconstante versus massa: wat kan je doen om in jouw ontwerp  $\Delta x$  groter en dus de kantelfrequentie lager te maken?

## Meetplan

Je gaat bij verschillende meting doen van het gedrag van je opstelling. De frequenties die ik aanraad dat je doet zijn ongeveer de volgende, maar misschien wil je dit op basis van je ontwerp aanpassen. Als je dat doet: prima. Je mag (natuurlijk) meer metingen doen, maar drie is het minimum. Zorg er altijd voor dat je zowel lager, als hoger, dan je kantelfrequentie minimaal één meting hebt en zorg ervoor dat op basis van je metingen geconcludeerd kan worden dat je opstelling aan de eis van een factor 3 amplitude afname bij 5Hz voldoet

- 1 Hz of 60 beats per minute (bpm)
- 3 Hz of 180 bpm
- 5 Hz of 300 bpm (of zo dichtbij mogelijk als het je lukt, dit is heel snel)

## Metingen doen

In het college en in de videos is uitgelegd hoe je metingen kan doen met je Arduino en de amplitude overdracht kan bepalen.

**Filmpje resultaat** Je moet een filmpje maken van je opstelling en je meting op je scherm. Doe dit bij een frequentie die hoger (sneller) is dan de eis, of bij een lagere frequentie waarbij je de factor van 3 in amplitude afname al haalt. Dan kunnen we namelijk in het filmpje zien dat jullie opstelling 'werkt' volgens de eis. Zorg ervoor dat je filmpje niet langer dan 30 seconden is (en liefst korter)

**Dit filmpje lever je op Brightspace in, niet naar Github uploaden!**

## Resultaat metingen

Maak opnieuw de grafiek van amplitude overdracht versus frequentie die je aan het einde van Evaluatie ook gemaakt hebt (dus met twee overdrachten) en voeg daar je meetpunten aan toe. Doe dit bij opdracht 7 in de template.

## Iteratie?

Kijk of het nodig is om nog een iteratie te doen. Dat kan het geval zijn als:

- Jullie opstelling nog niet aan de minimale eis voldoet.
- Door verbeteringen toe te voegen (of weg te halen!) tot een nog beter resultaat gaat leiden en er nog genoeg tijd is om deze verbeteringen aan te brengen.

Als je gaat itereren, kopieer dan benodigde cellen in de template. Leg goed je proces vast in de template zodat wij zien wat je gedaan hebt. Lever sowieso een foto, met korte beschrijving, van je uiteindelijke opstelling in zodat we kunnen zien wat er gemaakt is.

## Leerdoelen

Lees de leerdoelen nog eens terug. In de cel bij opdracht 8 in de template kan je met twee grafieken die je vandaag als het goed is al gemaakt heb laten zien dat je de leerdoelen onder de knie hebt. Als je de grafieken als figuren hebt opgeslagen, kan je deze makkelijk bij opdracht 8 in het template invoegen zonder extra python te hoeven schrijven of kopiëren. Je kan ze ook opnieuw uitrekenen, maar let dan heel goed op dat, door de code te runnen, je misschien niet precies dezelfde resultaten als erboven krijgt wanneer je niet netjes hebt geprogrammeerd met namen van variabelen.

## Inleveren resultaten

Je bent nu klaar met het invul template en kan deze op Github en Brightspace inleveren.

- **Klik bovenin je notebook op Kernel -> Restart and Run all**
- Check of er geen errors zijn en alle afbeeldingen zichtbaar zijn.
- Save je notebook (klik op save icoon).
- Commit en push je werk naar Github.
- Maak een pull request op Github aan van je huidige branch naar je main branch.
- Nodig (in GitHub) je TA uit om deze pull request te reviewen.
- Kopieer de link (URL) van je pull request en plak deze op Brightspace bij de assignment voor de ontwerpopdracht van vandaag.

**Wanneer je klaar bent, zet je je stoplicht op rood voor de TA. Laat je Pull Request binnen Github aan de TA zien. Je TA tekent dit af**

Op Brightspace is een aparte assignment waar je de video moet inleveren. Zet deze video niet bij de template op Github!

## Feedback op samenwerken geven

Kijk als herinnering nog even de video over feedback geven: <https://www.youtube.com/watch?v=16uW1kPc>  
Pak je logboek van vorige week erbij en geef elkaar allemaal feedback. Noteer je feedback in je logboek.

Verder levert elke student individueel het feedback-logboek in. Ook hiervoor is de deadline 17.30. Let op dat je deze inlevert bij de assignment van de huidige ontwerpopdracht.

## **Opruimen en aftekenen**

Zodra alles ingeleverd is ruim je de tafel op.

**Als je klaar bent met opruimen laat je je tafel aan je TA zien. Je TA geeft je toestemming om weg te gaan als alles netjes is.**