

Dynamisch balanceren

WB1643 Werktuigkundig Ontwerpproject 3

Giuseppe Radaelli
TU Delft / Mechanical Engineering

Gepubliceerd op 2026-02-24

Laatst bijgewerkt op 2026-07-29

Inhoudsopgave

1 Inleiding	2
2 Wat is dynamisch balanceren? Waar wordt het voor gebruikt?	2
3 Schudkrachten en schudmomenten	2
4 Oplossing door contra-massa's en contra-traagheidsmomenten	3
5 Geïntegreerde oplossingen	7
Bibliografie	9

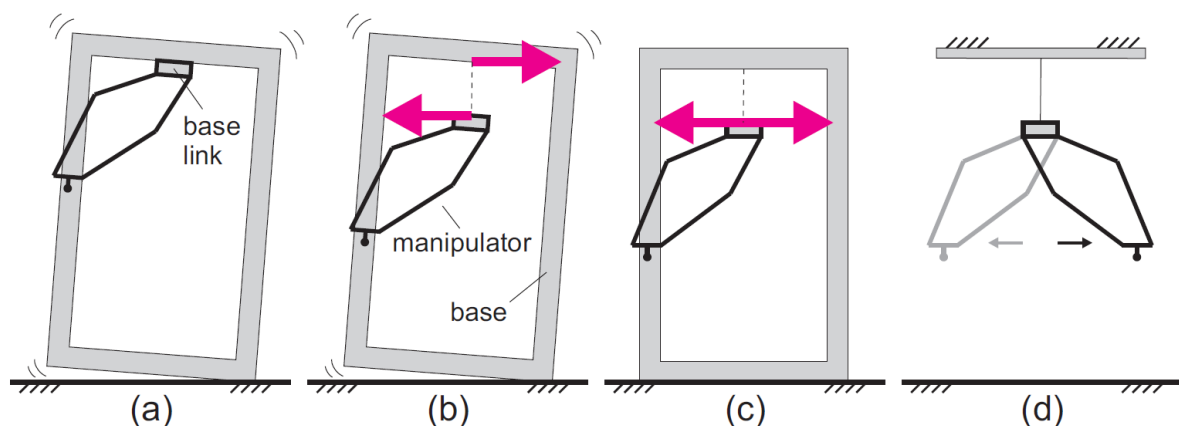
1 Inleiding

Deze pagina dient als naslag bij het college over “Dynamisch balanceren” horende bij het vak WOP3A.

2 Wat is dynamisch balanceren? Waar wordt het voor gebruikt?

Machines waarin grote versnellingen plaatsvinden kunnen gaan schudden vanwege de grote krachten die gepaard gaan met die versnellingen. Om dit tegen te gaan is men genoodzaakt om stijve machineframes en verbindingen met de vaste wereld te maken, met als gevolg grote, lompe constructies. Maar het kan ook anders. De schudkrachten die gepaard gaan met versnellingen kunnen vaak gebalanceerd worden met andere schudkrachten van meebewegende onderdelen die zodanig zijn ontworpen en gedimensioneerd dat de schudkrachten elkaar precies opheffen.

Men zet deze techniek dus in om precisie te vergroten bij hoge snelheden, om lichtere constructies te realiseren en om de interactie-krachten van machines met hun omgeving te minimaliseren.



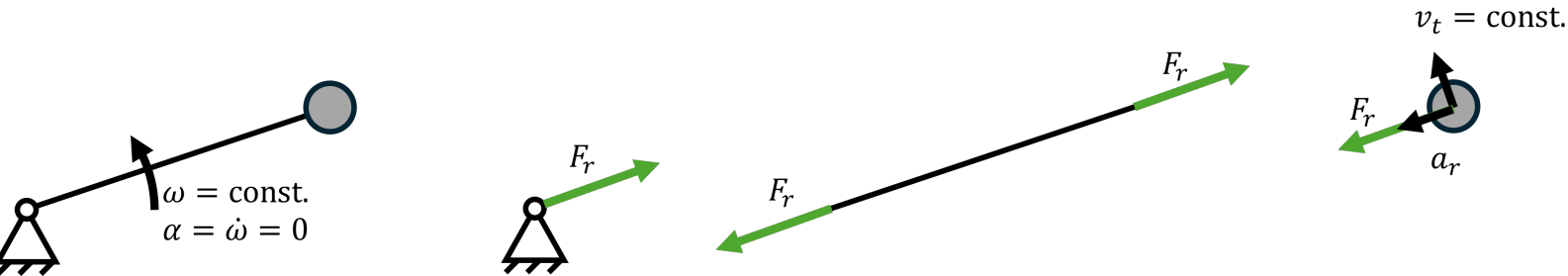
Figuur 1: De reactiekrachten die ontstaan op het frame van een snel bewegende machine worden geëlimineerd door Dynamisch Balanceren, waardoor veel lichtere constructies gerealiseerd kunnen worden. Figuur genomen uit [1]

In dit college analyseren we het probleem en de oplossingsrichtingen uitgaande van een systeem met één graad van vrijheid, namelijk een starre slinger met een (punt)massa die scharniert om een vast rotatiepunt, ofwel een excentrieke massa.

3 Schudkrachten en schudmomenten

Als de slinger roteert met een constante hoeksnelheid ($\omega = const.$, $\alpha = \dot{\omega} = 0$), dan ervaart het scharnier als gevolg van de rotatie van de slinger alleen een zogeheten centrifugale kracht (schijnkracht): de slinger moet naar het midden getrokken worden zodat het pad van de massa over een boog roteert, wat effectief een inwaartse radiale versnelling is. Het scharnier (de basis) ervaart een reactiekracht in tegenge-

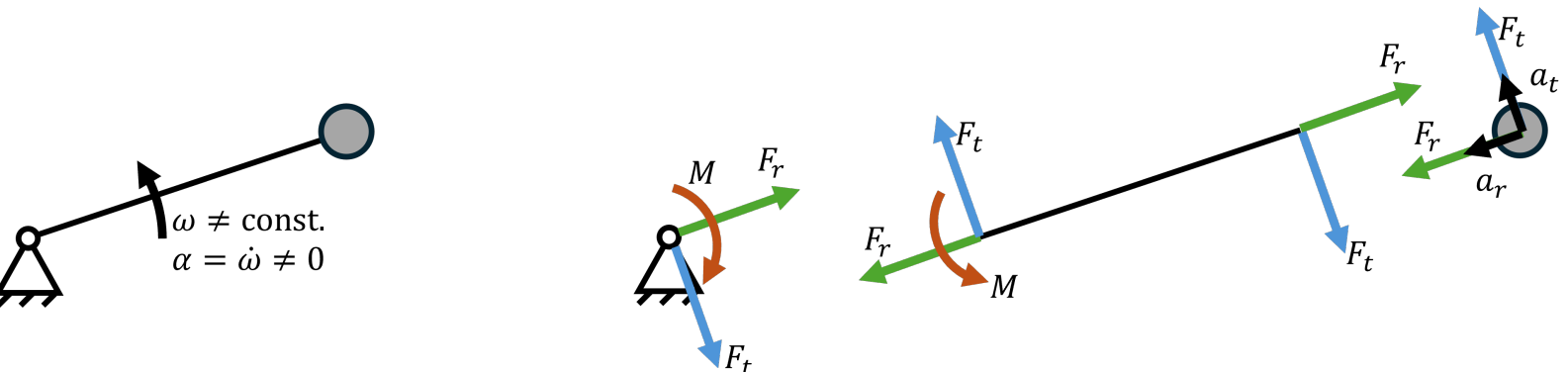
stelde richting, dus naar buiten gericht, in de richting van de stand van de slinger. Dit noemen we de radiale schudkracht F_r .



Figuur 2: Wanneer een slinger roteert ontstaat een radiale reactiekracht op de basis, ook als de hoeksnelheid constant is.

Als de slinger ook versnelt, dus met een niet-constante hoeksnelheid roteert ($\alpha \neq 0$), dan ervaart het scharnier ook een kracht in de richting tegenovergesteld aan de richting van de versnelling van de massa, zie Figuur 3. Dit noemen we de tangentiële schudkracht F_t .

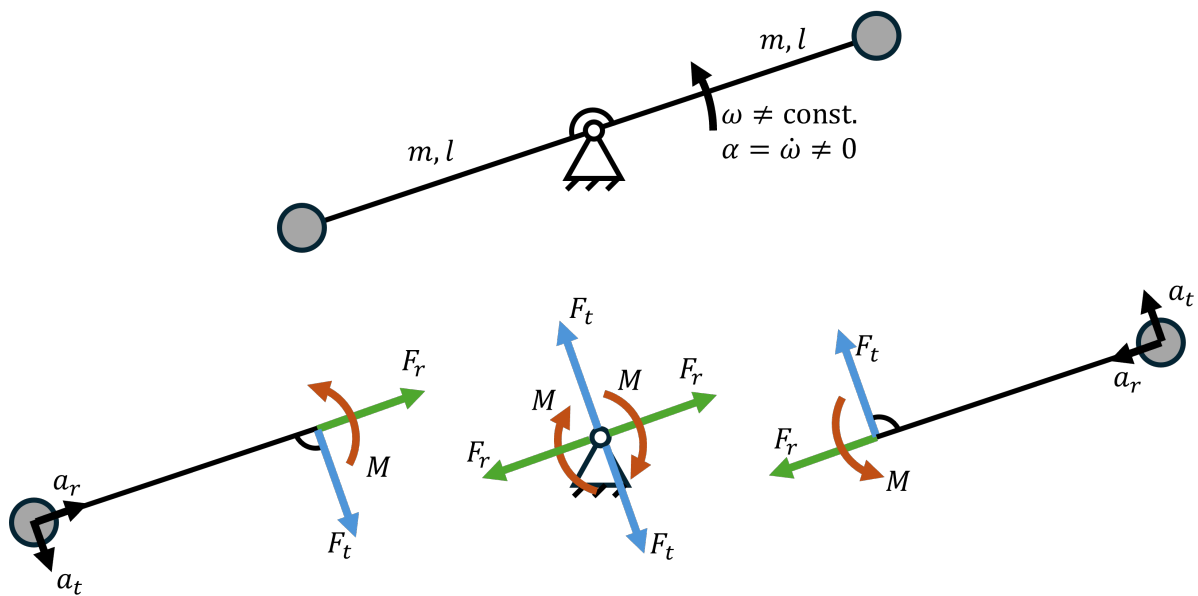
Bovendien is er ook een reactiemoment in de draairichting tegengesteld aan de draairichting van de hoekversnelling van de slinger, het schudmoment M .



Figuur 3: Wanneer een slinger daarbij ook versnelt ontstaat op de basis ook een tangentiële reactiekracht en een reactiemoment.

4 Oplossing door contra-massa's en contra-traagheidsmomenten

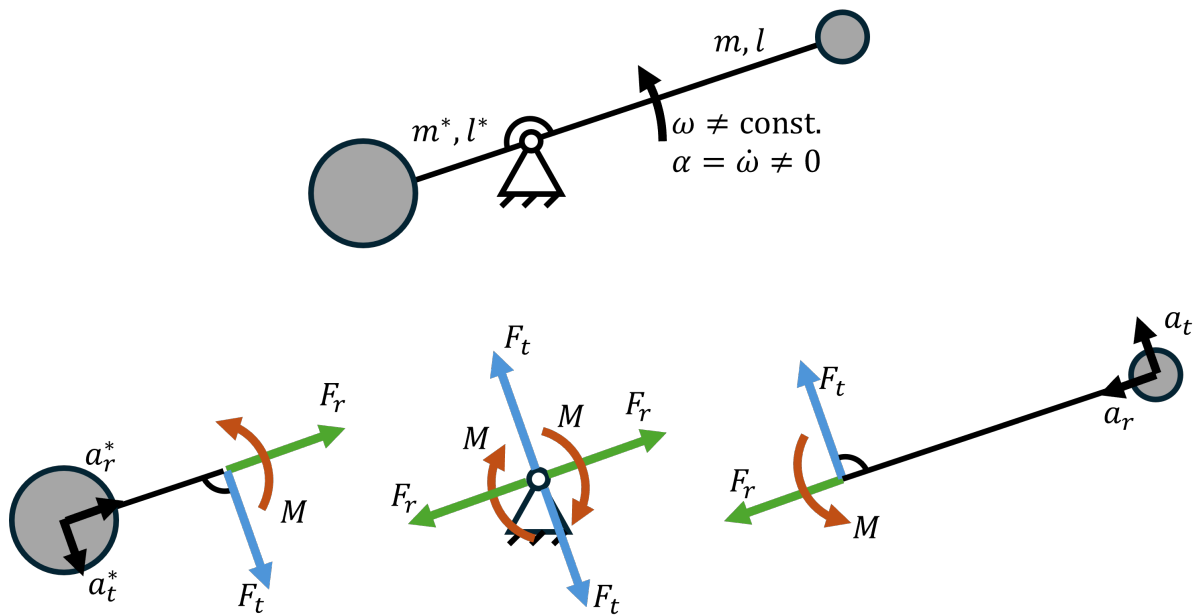
Als men aan de andere kant van het scharnier een gelijke slinger (contra-massa) toevoegt met dezelfde draairichting, dan heffen de reactiekrachten, zowel de radiale als de tangentiële, elkaar op, zie Figuur 4.



Figuur 4: Een gelijke, meedraaiende slinger elimineert de schudkrachten, maar versterkt het schudmoment.

Dit werkt ook als de contra-massa groter is maar de slinger korter, of andersom, zolang er maar aan de vergelijking $m^*l^* = ml$ wordt voldaan. Immers, zowel de radiale als de tangentiële kracht zijn proportioneel aan de massa én aan de slingerlengte ($F_r = m\omega^2 r$ en $F_t = m\dot{v} = mr\dot{\omega}$), dus als het product van de twee constant is, dan zijn de systemen in dat opzicht equivalent.

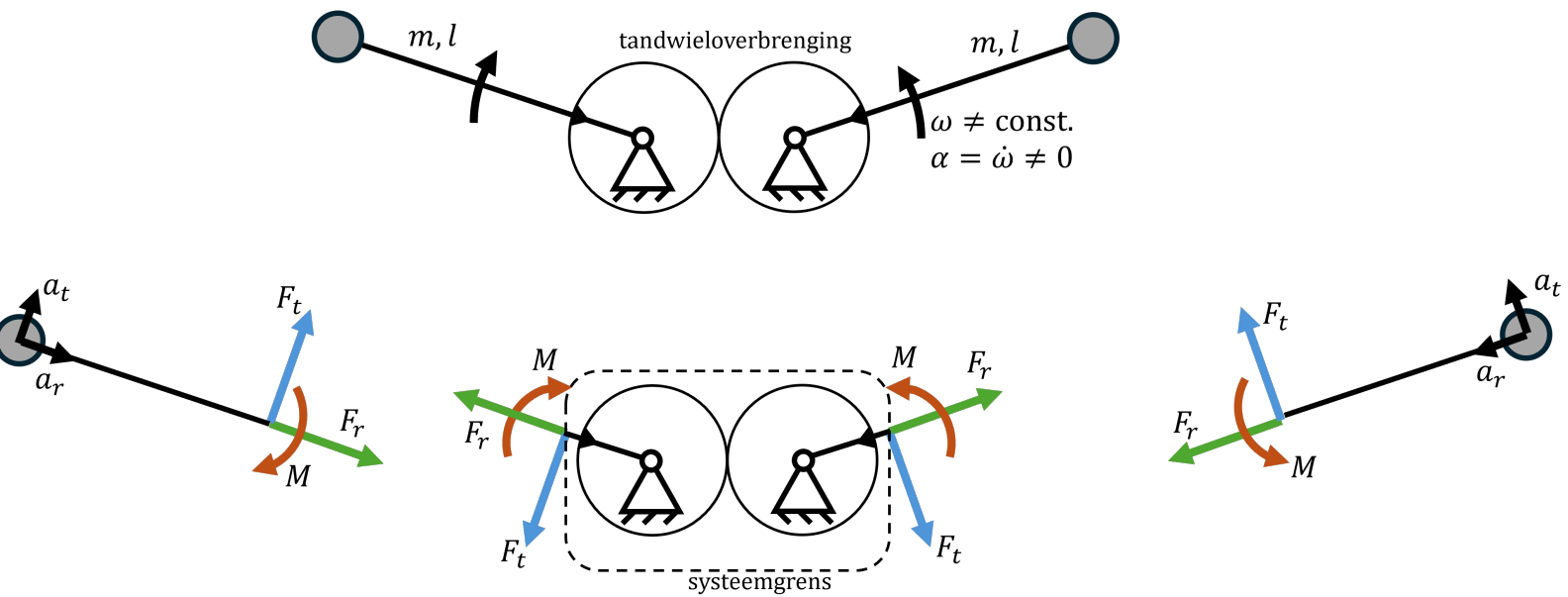
Anders benaderd komt het erop neer dat het massamiddelpunt van het hele systeem overeenkomt met het draaipunt. Effectief is de massa niet meer eccentrisch gemaakt waardoor de schudkrachten gelijk zijn aan nul.



Figuur 5: Ook een ongelijke, meedraaiende slinger kan gebruikt worden, zolang aan de vergelijking $m^*l^* = ml$ voldaan wordt.

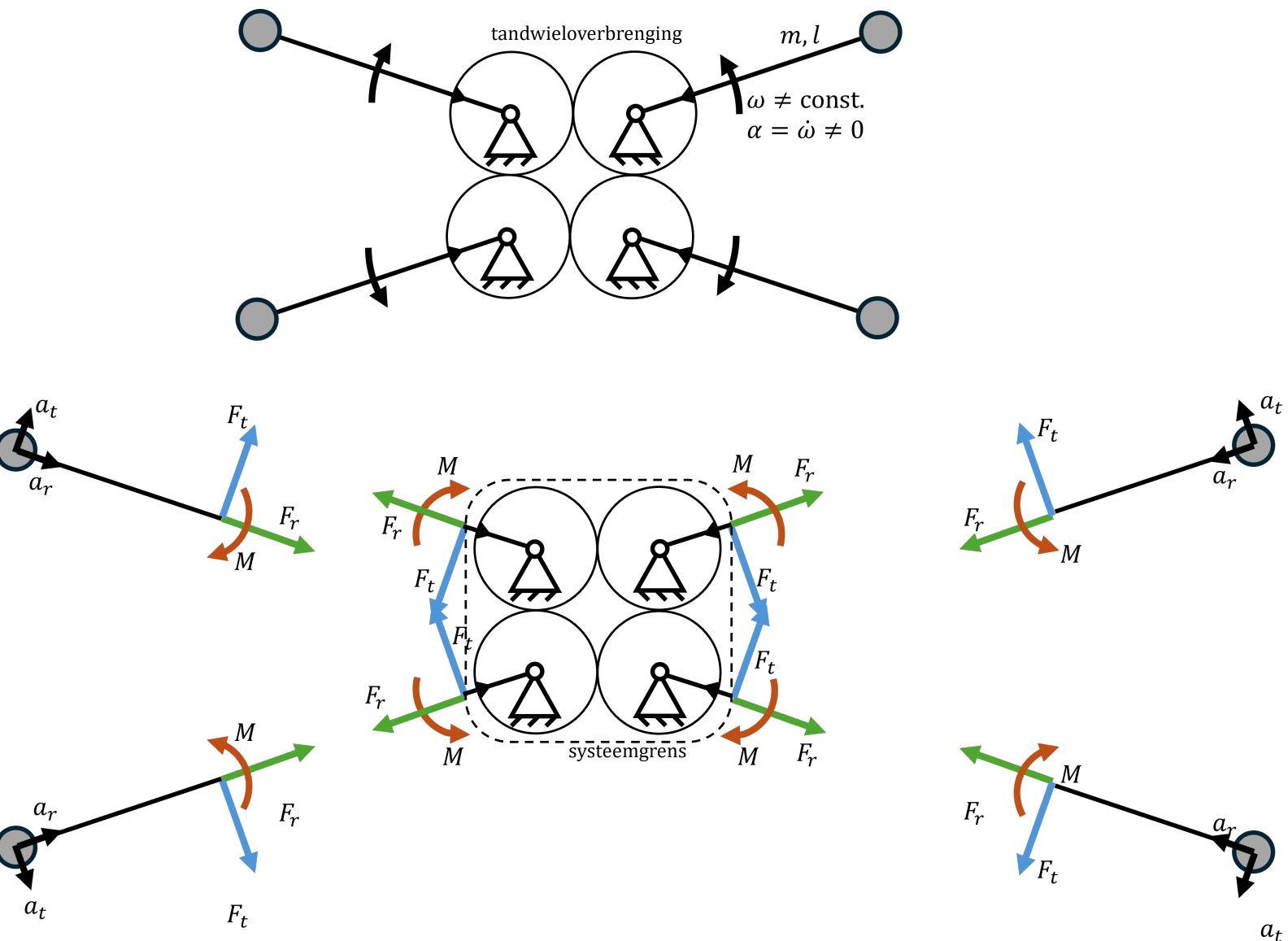
Wanneer er geen significante versnellingen aanwezig zijn is dit een voldoende oplossing. Veel systemen die voor een groot deel van de tijd, of bij benadering stationair draaien, zijn gebalanceerd op deze manier. Het systeem wordt zo gemaakt of achteraf afgesteld, dat het massamiddelpunt zich in het draaipunt bevindt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij autowielen, motor-rotoren, spinnende schijven zoals harde schijven, cd's en dergelijke.

Als er wel sprake is van grote en/of veel voorkomende versnellingen, zoals bij repeterende bewegingen, dan is dit geen voldoende oplossing. De schudkrachten zijn immers gebalanceerd, maar daar tegenover staat dat het schudmoment juist vergroot is doordat er een grotere traagheidsmoment mee-versnelt. Om het schudmoment te balanceren zou het dus nodig zijn dat de contra-massa in de tegenovergestelde richting zou draaien. Dit kan zowel actief, met een andere motor, als passief gedaan worden door bijvoorbeeld een tandwieloverbrenging, zie Figuur 6.



Figuur 6: Een slinger met tegengestelde draairichting elimineert het schudmoment, maar veroorzaakt in sommige richtingen een versterking van de schudkrachten.

Nu is het schudmoment wel gebalanceerd maar de schudkrachten niet. In de getekende stand van de slingers wordt de radiale schudkracht grotendeels gebalanceerd maar wordt de tangentiële schudkracht juist versterkt, wat zou resulteren in een verticale schudbeweging. Een mogelijke oplossing is een dubbel-symmetrische opstelling van slingers, zie Figuur 7 die resulteert in een stilstaand massamiddelpunt, en dat voor elke linksom draaiende (versnellende) slinger ook een rechtsom draaiende (versnellende) slinger aanwezig is.



Figuur 7: Een dubbel-symmetrische uitvoering zorgt voor volledig balans van zowel schudkrachten als schudmomenten.

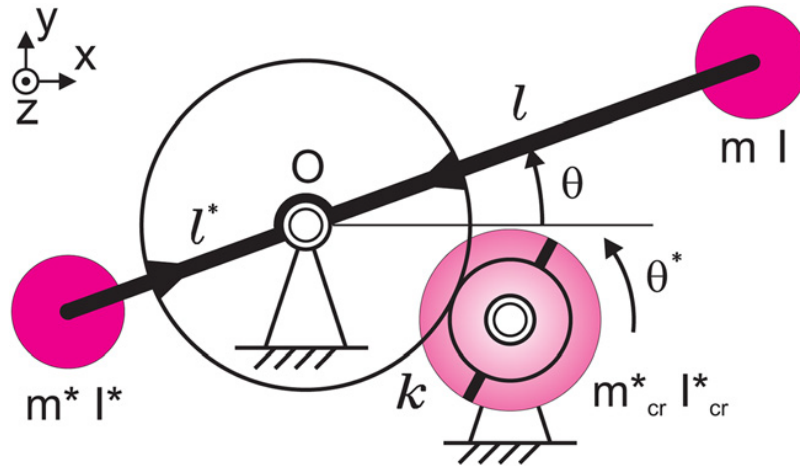
De video toont door het bijschakelen van de slingers de verschillende opties van onbalans, naar gedeeltelijk balans, naar volledig balans.

[images/DynamischBalanceren.mp4](#)

5 Geïntegreerde oplossingen

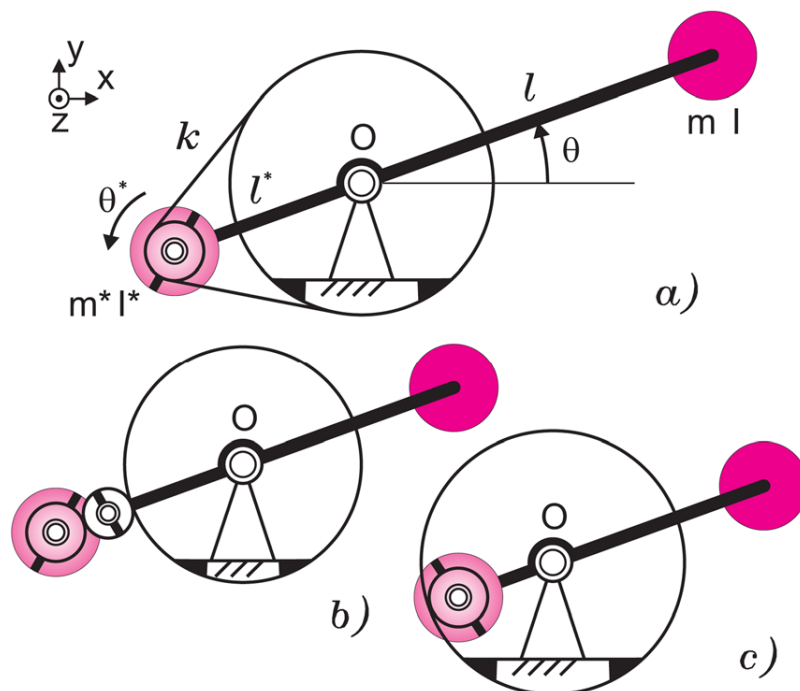
De dubbel-symmetrische opstelling is conceptueel eenvoudig, maar in de uitvoering niet optimaal vanwege de sterk toegenomen complexiteit en gewicht. Als men beseft dat een moment een vrije vector is, en dus dat de positie van het moment op het frame niet van invloed is, kan men het balanceren van het schudmoment ook realiseren met een contra-roterende traagheidsmoment. Dit kan een schijf zijn met een ander draaipunt dan die van de slinger, en waarvan het massamiddelpunt stil staat. Het contra-roterende traagheidsmoment introduceert geen schudkrachten en

kan de schudmomenten balanceren (wanneer snelheid en massatraagheidsmoment goed zijn afgestemd aan de slinger met contra-massa). Wederom kan het contra-roterende traagheidsmoment apart aangedreven zijn of mechanisch gekoppeld, zoals in Figuur 8.



Figuur 8: Het balanceren van het schudmoment kan ook gedaan worden door een aparte traagheidsmoment die in tegengestelde richting draait [2].

Men kan nog een stap verder gaan door de contra-massa en het contra-roterende traagheidsmoment samen te voegen. De contra-massa kan ook nog een rotatie gegeven worden op de plek van bevestiging op de slinger, immers de locatie van het moment is niet van invloed. De locale rotatie om het bevestigingspunt is in tegengestelde richting van de rotatie van de slinger. Dit kan bewerkstelligd worden door verschillende mechanische transmissies, zoals hieronder weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Het is ook mogelijk om het contra-roterende traagheidsmoment samen te voegen met de contra-massa. Dit bespaart gewicht. In de figuren zijn verschillende uitvoeringen getoond [2].

Bibliografie

- [1] V. van der Wijk, "Methodology for analysis and synthesis of inherently force and moment-balanced mechanisms", PhD Thesis - Research UT, graduation UT, University of Twente, Netherlands, 2014. doi: 10.3990/1.9789036536301.
- [2] V. van der Wijk, B. Demeulenaere, C. Gosselin, en J. L. Herder, "Comparative Analysis for Low-Mass and Low-Inertia Dynamic Balancing of Mechanisms", Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 4, nr. 3, p. 31008, jun. 2012, doi: 10.1115/1.4006744.