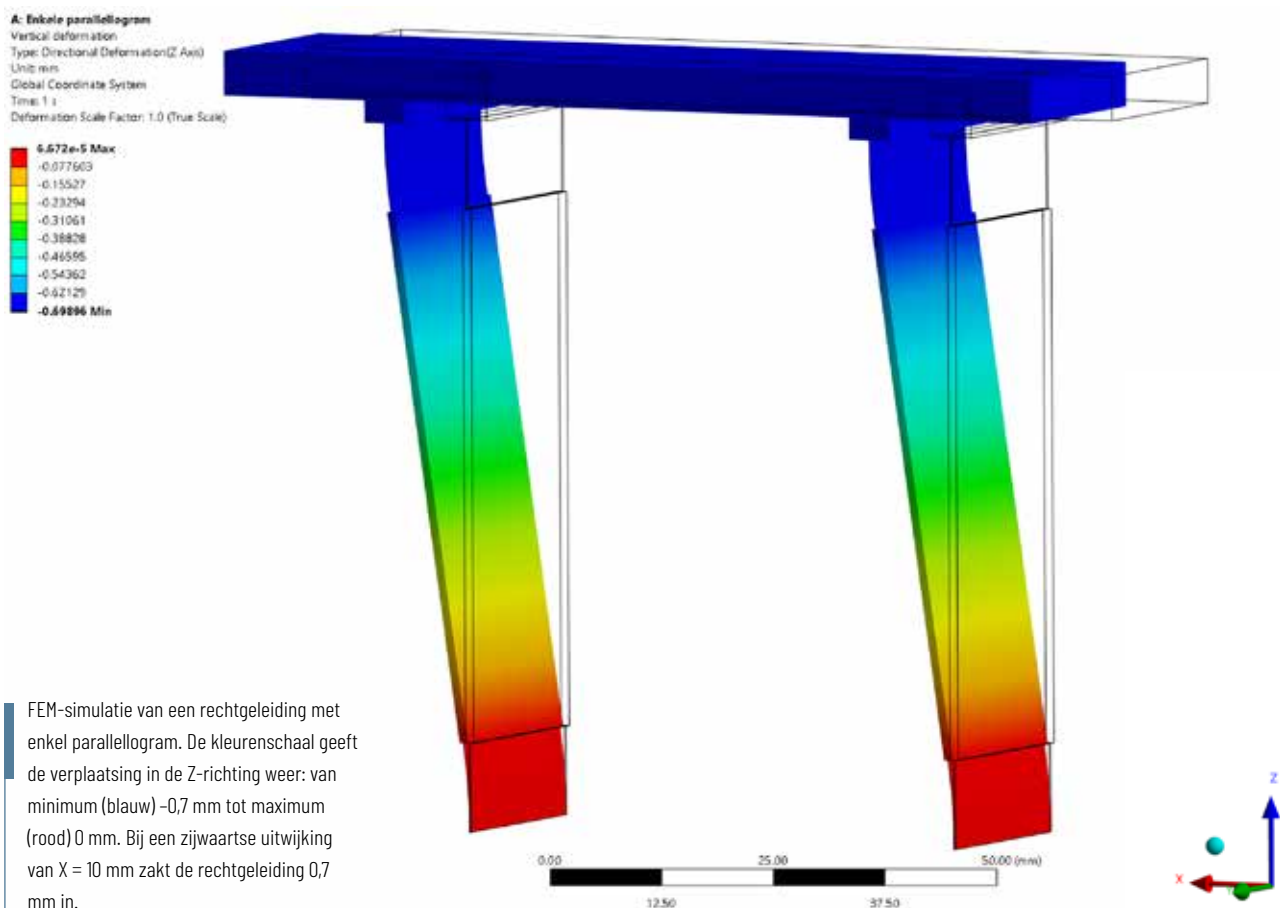


Rechtgeleiding realiseren en damping demonstrieren

Interne kennisoverdracht is essentieel voor de professionele ontwikkeling van engineeringafdelingen en ingenieursbureaus. Nobleo Technology in Eindhoven steekt er veel energie in, met onder meer competence meetings en demonstrators. Een voorbeeld van dat laatste is de bouw van de 'Eddy-current demonstrator', een rechtgeleidingsmechanisme waarin trillingen worden gedempt met behulp van wervelstroom.

TEKST: MAX VAN LITH EN HANS VAN EERDEN



Constructies voor het snel en nauwkeurig bewegen en positioneren worden licht en stijf – en derhalve vaak slechts licht gedempt – uitgevoerd. Dat geeft ze een hoge eerste eigenfrequentie, wat een groot dynamisch bereik (regelbandbreedte) mogelijk maakt. Dergelijke constructies zijn wel gevoelig voor verstoringen zoals vloertrillingen uit de omgeving, reden waarom soms toch demping moet worden toegepast. Daarnaast moet van de elastische rechtgeleidingen die vaak worden gebruikt de rechtlijnigheid zeer voorspelbaar zijn. De demonstrator van Nobleo laat voor beide uitdagingen een oplossing zien. De demonstrator bestaat uit een bewegend platform dat is voorzien van bladveren die beweging in één richting vrijlaten. Ze zijn gerangschikt in een dubbel parallellogram om de zakking te voorkomen die onvermijdelijk optreedt bij een enkel parallellogram. Aan de hand van een eindige-elementen-methode (FEM) model wordt hieronder uitgelegd hoe de rechtgeleiding werkt. In het FEM-model is rekening gehouden met grote verplaatsingen; het gaat om niet-lineaire berekeningen. De parallelle bladveren zijn in het model 25 mm breed en 80 mm lang. In het midden is er een 60 mm lange, 1 mm dikke ver-

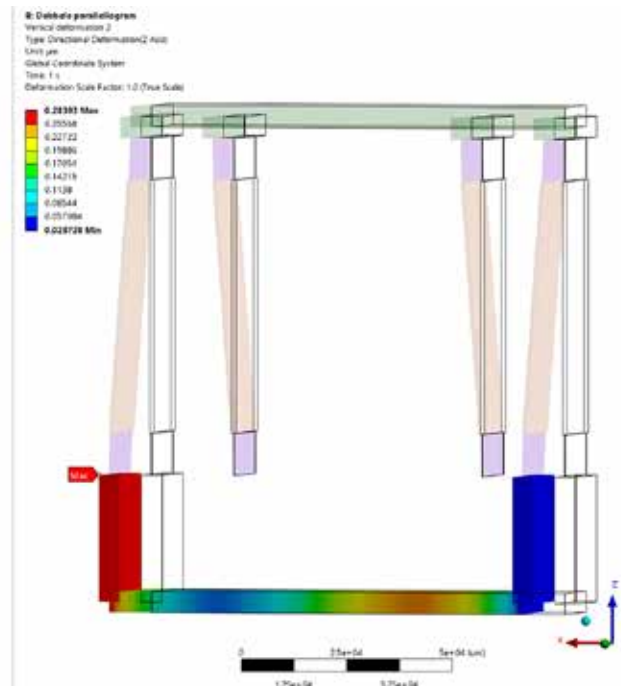
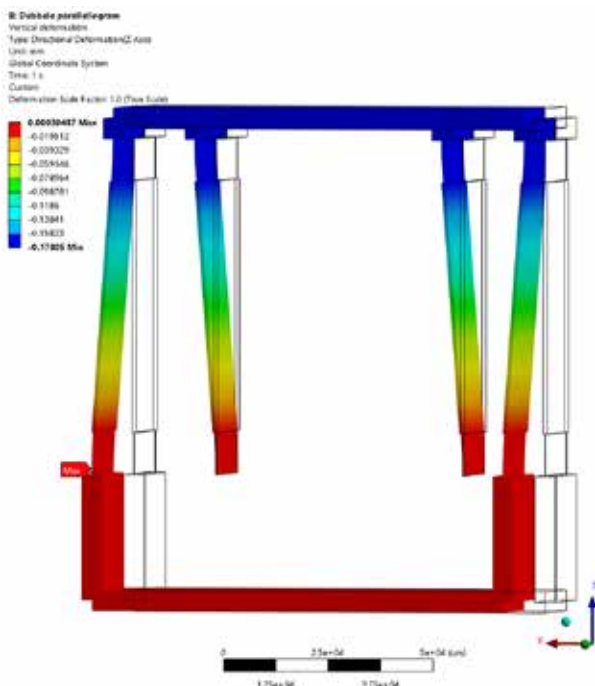
steviging. De buigende gedeeltes zijn (nominaal) 0,2 mm dik. Aandrijving vindt plaats in de X-richting, haaks op de bladveren. De laterale Y-richting is horizontaal evenwijdig aan de bladveren en de Z-richting is verticaal.

Enkel parallellogram

Bij een enkel parallellogram zullen de bladveren bij een X-verplaatsing van bijvoorbeeld 10 mm buigen en daarmee een parasitaire beweging in de Z-richting veroorzaken. Deze doorzakking is te berekenen met $\Delta Z = C \cdot x^2 / L$. De waarde van constante C wordt bepaald door de relatieve lengte van de versterving in de bladveren, waarvoor formules zijn te vinden in de literatuur. Uitgaande van $C = 3/5$, wat overeenkomt met een niet-versterfde bladveer, komt de schatting voor de inzakking uit op $\Delta Z = (3/5) \cdot 10^2 / 80 = 0,75$ mm. Het FEM-model geeft een waarde van 0,7 mm. In veel gevallen is de rechtlijnigheid van deze geleiding onvoldoende.

Dubbel parallellogram

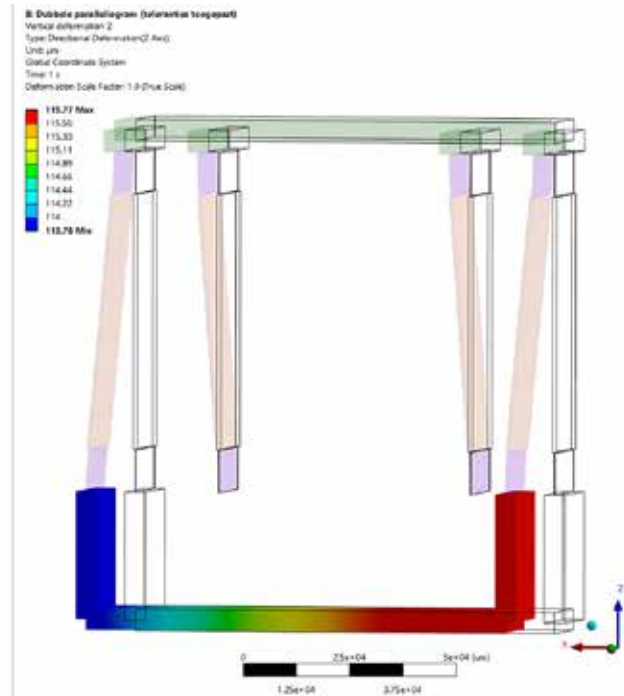
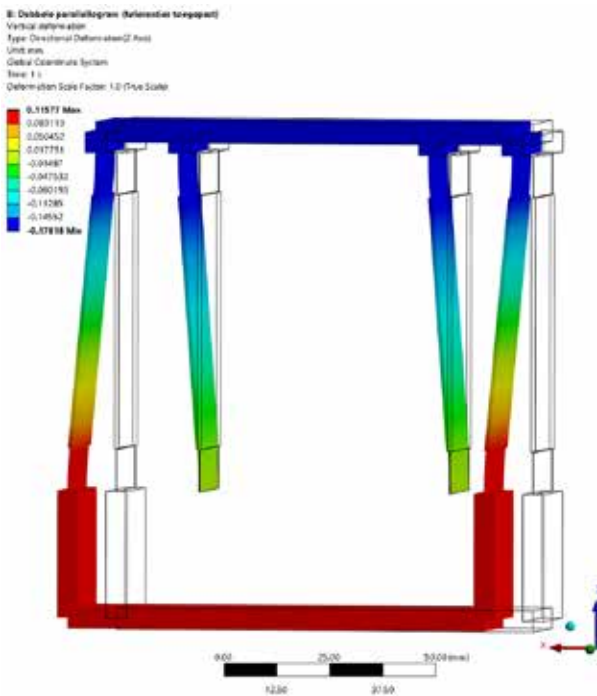
Een bekende manier om doorzakking tegen te gaan is toepassing van een dubbel parallellogram. Hierin >



FEM-model van een dubbel parallellogram; de twee bladveren die lijken te zweven zijn aan de onderkant verbonden aan de vaste wereld. De kleurschaal geeft de verplaatsing in de Z-richting weer bij een zijwaartse uitwijking van $X = 10$ mm.

Links (schaal -18 tot 0 mm): De tussentrap (boven) beweegt 0,18 mm omlaag en de eindtrap (onder) beweegt 0,18 mm omhoog ten opzichte van de tussentrap.

Rechts (schaal 0,03 tot 0,3 µm): Resultaat voor alleen de eindtrap; deze beweegt 0,3 micrometer in de Z-richting.



FEM-model van een dubbel parallellogram waar een tolerantie is toegepast. Het onderste deel van de meest linkse bladveer is 0,1 mm dik, alle overige bladveerdelen (buiten de dikkere verstevigingen) zijn nog steeds 0,2 mm. De kleurenschaal geeft de verplaatsing in de Z-richting weer bij een zijwaartse uitwijking van X = 10 mm. Links (schaal -0,18 tot 0 mm) het hele mechanisme. De tussentrap voelt bijna geen effect van de tolerantie en zakt nog steeds 0,18 mm in. Rechts (schaal 114 tot 116 µm) alleen de eindtrap. Vanwege de tolerantie is deze minder stijf en wijkt relatief verder uit in de X-richting. De verplaatsing in de Z-richting is nu ongeveer 115 micrometer.

staan twee, nominaal identieke, rechtgeleidingen in serie gekoppeld zodanig dat de parasitaire effecten elkaar opheffen. De stijfheid is gehalveerd, maar de doorzakking is theoretisch verholpen. In het FEM-model van het dubbele parallellogram beweegt de eindtrap nog steeds 10 mm in de X-richting. De tussentrap beweegt 5 mm en de verwachte inzakking bedraagt $\Delta Z \approx (3/5) \cdot x^2/L = (3/5) \cdot 5^2/80 = 0,19$ mm. De eindtrap beweegt identiek maar tegenovergesteld aan de tussentrap in de Z-richting, waardoor daar geen parasitaire beweging meer is te verwachten.

De eindtrap beweegt in het FEM-model nu nog slechts 0,3 micrometer in de hoogte. De resterende afwijking van exact nul is te verklaren door kleine, onbedoelde asymmetrie in het FEM-rooster en numerieke ruis. De tussentrap en de eindtrap voelen dezelfde aandrijfkraft omdat ze in serie staan en hun stijfheid is gelijk omdat de geometrie van beide parallellogrammen identiek is. Dat zorgt voor gelijke uitwijking in de X-richting en dus ook voor gelijke (maar tegenovergestelde en dus gecompenseerde) doorzakking in de Z-richting.

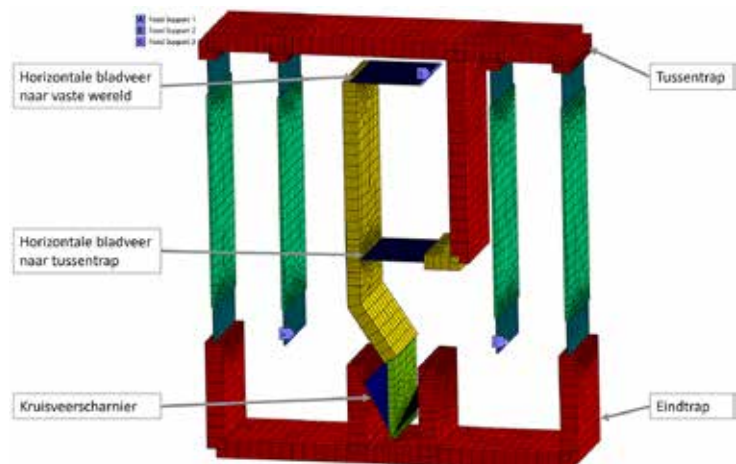
Bij een stijfheidsverschil tussen de tussentrap en de eindtrap gaat deze redenering niet helemaal op. Toleranties op de dikte en lengte van de bladveren kunnen significantie stijfheidsverschillen opleveren. Het stijvere parallellogram zal minder vervormen dan het slappere. De verschillende uitwijkingen in de X-richting, van tussentrap en eindtrap, resulteren dan in verschillende Z-doorzakkingen. Oftewel, de compensatie is incompleet. Bovendien is de

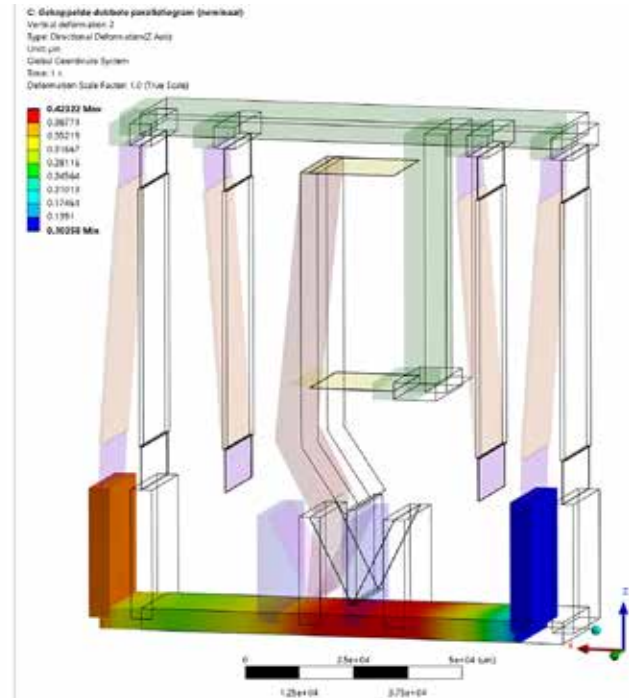
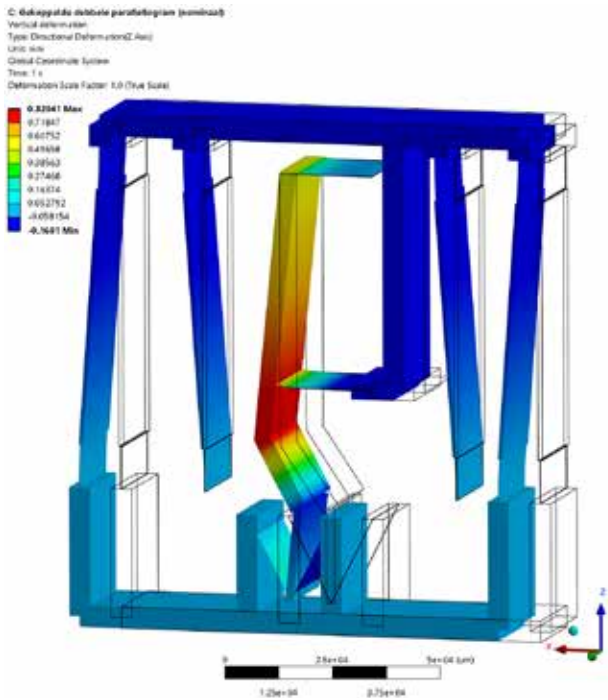
tussentrap zelf een massa die vastgehouden wordt door, in de X-richting, slappe bladveren. De bijhorende lage eigenfrequentie kan de bandbreedte van een regelsysteem beperken.

FEM-model voor een dubbel parallellogram met koppeling middels een 1:2 hefboom, die bepaalt dat de tussentrap de halve slag maakt ten opzichte van de eindtrap. Fixed supports A, B en C stellen een verbinding met de vaste wereld voor.

Het effect van toleranties

Op de dikte en lengte van de (buigende delen van de) bladveren horen strakke toleranties te staan. Te dikke bladveren kunnen zorgen voor te hoge aandrijfkraften en buigspanningen. Te dunne bladveren kunnen zorgen voor te lage (laterale) stijfheid van de geleiding. Een aanpassing van het FEM-model illustreert het effect van maaktoleranties. Het onderste deel van de meest linkse bladveer wordt nu 0,1 mm dik, terwijl alle andere buigende delen de nominale 0,2 mm dikte





FEM-model van het gekoppelde dubbele parallellogram. Verplaatsing in de Z-richting, bij een uitwijking van de eindtrap van 10 mm in de X-richting.

Links (schaal -17 tot 1 mm) het gehele mechanisme.

Rechts (schaal 0,1 tot 0,4 µm) alleen de eindtrap, die een parasitaire beweging vertoont van minder dan 0,4 micrometer.

behouden. Ook alle overige maten blijven nominaal. Het volgende FEM-model toont dus het effect aan van een enkele tolerantie (afwijking van de nominale maat) op de rechtlijnigheid van een dubbel-parallelogramgeleiding.

Het toepassen van deze enkele tolerantie veroorzaakt een 115 micrometer grote verplaatsing in de Z-richting. Het dubbele parallellogram geeft dus niet meer een rechtlijnige geleiding; in veel precisietoepassingen is 115 micrometer geen acceptabele parasitaire beweging. Er is nog een verbeteringslag nodig.

Koppelende 1:2 hefboom

Het mechanisme in de demonstrator bevat een 1:2 hefboom, een bekende oplossing voor het geschetste probleem. De taak van de hefboom is om de tussentrap te 'bepalen' om de halve slag te maken ten opzichte van de eindtrap. Dynamische toepassingen met hoge bandbreedtes zijn weer mogelijk, mits de hefboom stijf en licht genoeg gemaakt kan worden. Er is een hefboom met elastische scharnieren ontworpen die binnen het volume van het bestaande dubbele parallellogram past. Vanuit dit ontwerp is de rechtgeleiding als een enkel onderdeel met 3D-printen gemaakt voor de demonstrator. Voor precisietoepassingen kan een monolithische rechtgeleiding middels draadvonken (EDM) worden geproduceerd.

Aan de eindtrap worden twee bladveren vastgezet die in een V-vorm staan opgesteld, een kruisveerscharnier. Het draaipunt ligt ruwweg in de kruising van de middelvlakken van deze bladveren. Aan het

kruisveerscharnier zit het ene uiteinde van een hefboom vast, terwijl het andere uiteinde aan de vaste wereld is bevestigd met een horizontale bladveer. Bij het bewegen van de eindtrap zal de hefboom nu roteren om het draaipunt van de kruisveren van de eindtrap. Midden tussen het draaipunt van de kruisveren en de horizontale bladveer naar de vaste wereld zit een tweede horizontale bladveer, vastgemaakt aan de tussentrap van de rechtgeleiding. Deze bladveer zit dus halverwege de hefboom en zal daarom de halve afstand afleggen ten opzichte van de eindtrap. Omdat de horizontale bladveer stijf is in de X-richting, bepaalt deze dat de tussentrap meebeweegt, zodat die de halve slag maakt ten opzichte van de eindtrap.

Nota bene: Het maakt de rechtgeleiding niet uit wat de vaste wereld is en wat de eindtrap. In de demonstrator is dit omgekeerd ten opzichte van de getoonde FEM-modellen.

De werking van dit ontwerp wordt wederom middels een tweetal FEM-modellen geïllustreerd. Eenmaal met nominale maten, en eenmaal met dezelfde tolerantie als eerder toegepast op het (niet-gekoppelde) dubbele parallellogram.

Zoals uit het nominale FEM-model blijkt, is de verplaatsing van de eindtrap in theorie nog steeds klein. Deze verbuigt minimaal vanwege de kracht die de hefboom in de verticale richting uitoefent, maar de verplaatsing in de Z-richting is slechts zo'n 0,4 micrometer. Dat is dus ongeveer hetzelfde als in het nominale geval zonder de koppeling. Het effect van de koppeling is pas duidelijk te zien bij toepas- >

sing van de tolerantie. In dit geval is de parasitaire beweging minder dan 1 micrometer; vergeleken met het dubbele parallellogram zonder de koppeling is dit een 115 keer betere rechte lijnigheid.

Robuust voor praktische toleranties

De FEM-modellen hebben aangetoond dat het voorgestelde ontwerp robuust is voor variaties op de stijfheid van de buigende elementen. Dat geeft de constructeur de vrijheid om ruimere toleranties op de bladveren te zetten. Daarnaast zijn de bladveren uitgevoerd met verstevigingen in het midden, om meerdere redenen. Ten eerste zorgt het voor een betere verhouding van de stijfheid in verschillende richtingen en voor een hogere knikbestendigheid. Een vuistregel luidt: voor een 9 maal hogere knikbestendigheid is een 20% grotere aandrijfkracht nodig. Daarnaast is de zijwaartse stijfheid (in de Y-richting) hoger. De bladveren worden zo meer op afschuiving belast dan op buiging.

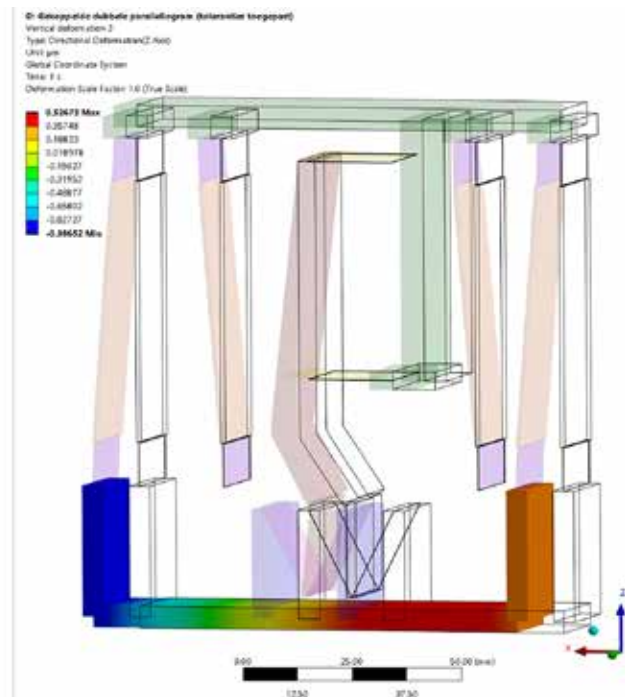
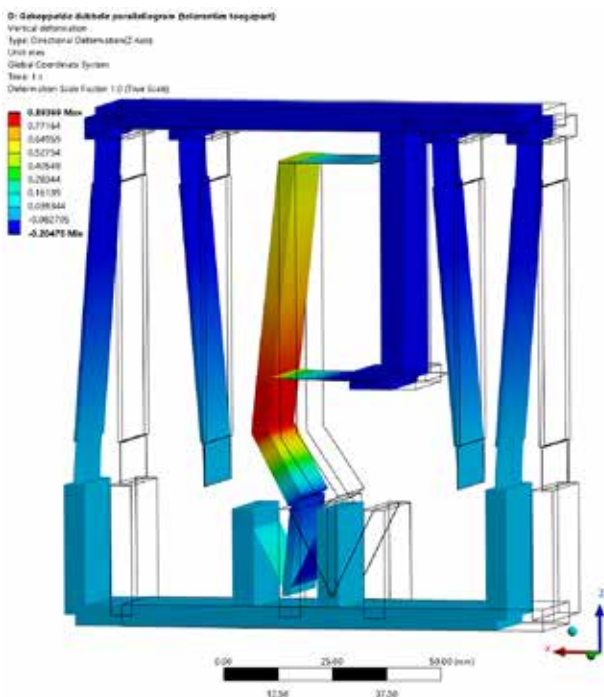
De verstevigingen zorgen ook voor een betere maakbaarheid bij productie middels EDM. De toleranties op de buigende delen zijn typisch vele malen strakker dan op de verstevigingen. Hoe korter de snijafstand die met hoge precisie moet worden uitgevoerd, hoe minder kostbaar de bewerking is.

De verstevigingen kunnen minder precies en daarmee sneller worden uitgesneden. Dat beperkt de machinetijd en verlaagt daarmee de kosten. De fabrikant heeft nu ook de mogelijkheid om 'dammetjes' op de verstevigingen te laten staan. Tijdens het snijden zullen de dammetjes het product stijf houden totdat alle precieze sneden klaar zijn. Als laatste bewerking kunnen de dammetjes worden doorgesneden. Dit levert plaatselijk een ruwe en onnauwkeurige snede op, maar dat is juist op de versteviging acceptabel.

Het is mogelijk dat de toleranties alsnog door de aandrijfstijfheid worden bepaald. Bijvoorbeeld als een actuator een beperkte kracht kan leveren, of als de actuator slechts een beperkte warmte in het systeem mag afvoeren. De elastische hefboom voegt helaas een parasitaire stijfheid in de aandrijfrichting toe. Aan de andere kant heeft de hefboom geen functie om de geleiding lateraal (in de Y-richting) stijf te maken. Het is dus mogelijk om, voorafgaand aan het EDM'en, lokaal de breedte van de hefboombladveren te verminderen. Ook dit concept is zichtbaar in de geprinte demonstrator.

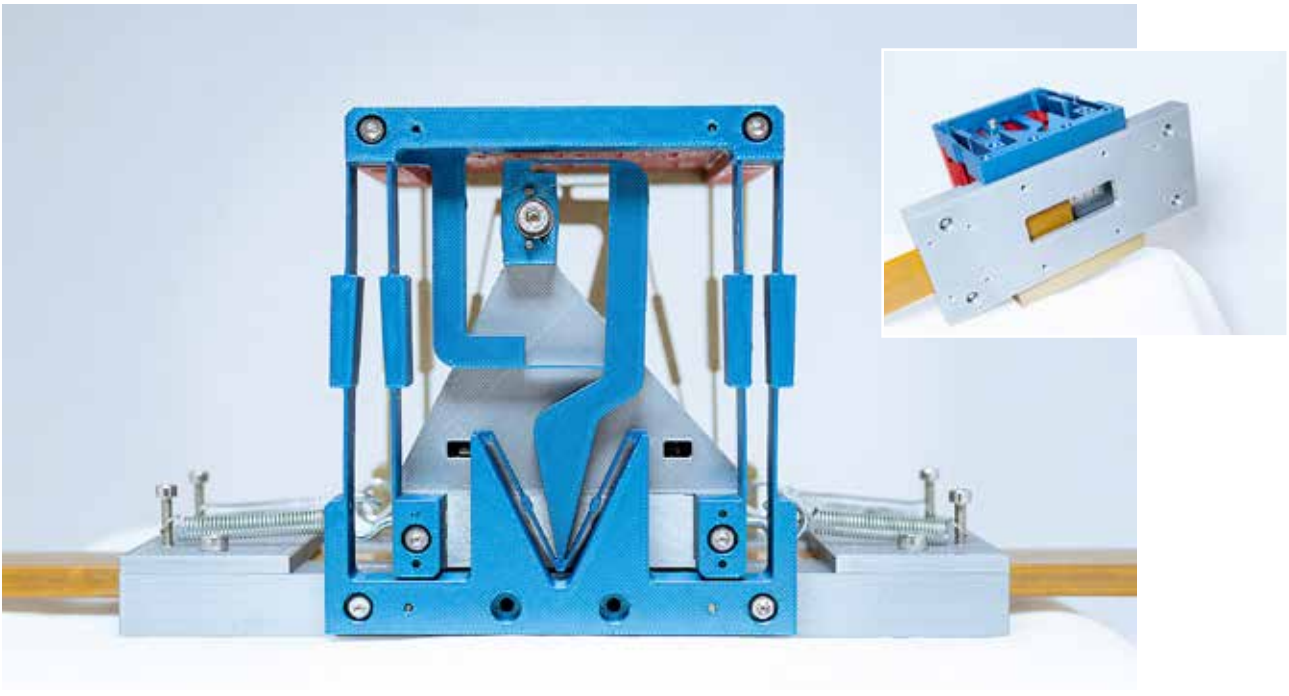
Asymmetrische uitvoering

Het bewegende platform van de demonstrator



FEM-model van het gekoppelde dubbele parallellogram, waarbij een tolerantie is toegepast. Het onderste deel van de meest linkse bladveer is 0,1 mm dik, terwijl alle overige bladveerdelen (buiten de dichtere verstevigingen) de nominale 0,2 mm dik zijn. Verplaatsing in de Z-richting, bij een uitwijking van de eindtrap van 10 mm in de X-richting. Links (schaal -20 tot 1 mm) het gehele mechanisme.

Rechts (schaal -1 tot 0,5 µm) alleen de eindtrap, die een parasitaire beweging vertoont van minder dan 1 micrometer, waar dat zonder de koppeling 115 micrometer was.



De Eddy-current demonstrator met 3D-geprinte rechtgeleidingsmechanismen (aan de achterzijde een iets andere uitvoering) en een 'damper' in de vorm van een koperen strip waar magneten over bewegen (zie onderaanzicht). De demping vindt hier in de aandrijfrichting plaats; voor de in dit geval gewenste grotere stijfheid zijn veertjes bevestigd. Vanwege de bewegingsvrijheid in deze richting is het effect van demping veel beter te zien en te voelen. Ingenieurs 'kijken' immers met hun handen. Ze voelen dat het mechanisme bij aanstoten bijna instantaan reageert en weer stilstaat door de demping. (Foto's: Richard van de Ketterij, Nobleo)

heeft aan beide zijden (in de Y-richting) een gekoppeld dubbel parallellogram gekregen, voor het creëren van een hogere RX-stijfheid (voor rotatie om de X-richting). Dit zorgt er wel voor dat het bewegende platform overbepaald zou zijn opgehangen. Beide mechanismen zouden namelijk slechts de X-richting vrijlaten, en alle overige vrijheidsgraden willen vasthouden. Voor een demonstrator is dat niet erg, want de werking van de rechtgeleiding is nog steeds goed te begrijpen. In precisietoepassingen is hiervoor echter wel een oplossing gewenst. Het is een optie om het bewegende platform asymmetrisch op te hangen. Het bladveermechanisme is dan aan één kant breder dan aan de andere kant van het bewegende platform. De smalle kant gedraagt zich dan meer als een verzameling sprietten die de Z-richting vasthouden. De brede kant houdt dan Z, Y, RY en RZ vast. Doordat Z tweemaal wordt vastgehouden, op twee plekken in de Y-richting, is dus RX ook geborgd.

Een voordeel is ook dat de totale Y-stijfheid groter is bij dezelfde totale breedte. De Y-stijfheid van dit mechanisme schaalt namelijk met de breedte van de parallellogram tot de derde macht: $c_y \propto b_{links}^3 + b_{rechts}^3$. Stel, het ontwerpvolume laat $b_{links} + b_{rechts} = 1$ toe. Een symmetrisch ontwerp resulteert dan in $c_y = K(0,5^3 + 0,5^3) = 0,25K$, waarbij K de overige geometrie van de bladveren en de elasticiteitsmodulus voorstelt. Voor een ontwerp waarbij 90% van de breedte voor de linkerkant beschikbaar is, en dus 10% voor de rechterkant, wordt dit: $c_y = K(0,9^3 + 0,1^3) = 0,73K$. Het ontwerp met de 90/10-

verhouding verhelpt niet alleen de overbepaaldheid, ook is dus de totale stijfheid in de Y-richting nog eens ongeveer drie keer zo groot.

Dwarsstijfheid onvoldoende

Het optische systeem waarop de demonstrator is gebaseerd, is in de (laterale) horizontale richting stijf. Dit voorkomt echter niet dat verstoringen, zoals vloertrillingen, het geheel in trilling brengen. Juist vanwege het strikt volgen van de VanderHoekse constructieprincipes is de constructie vrijwel ongedempt. Het verder verhogen van de stijfheid, of het verder verlagen van de massa, wordt steeds moeilijker. Daarom is onderzoek gedaan naar het toepassen van demping om de verstoringen voldoende te onderdrukken.

Actieve demping, met extra actuator en regeling, is een optie, maar voegt veel complexiteit, kosten en volume toe. Passieve demping, bijvoorbeeld met rubber, is in opkomst als een compacte, eenvoudige en effectieve oplossing. Met inzicht in de systeemdynamica zijn de nadelen, zoals onvoorspelbaarheid van het materiaal en tijdsafhankelijk gedrag, te ondervangen. In (vacuüm)omgevingen waar reinheid vereist is, kan rubber echter uit den boze zijn. Onder invloed van contact en vermoeiing door beweging zouden korreltjes kunnen afbrokkelen, of het materiaal zou te veel kunnen uitgassen.

Een schoon, passief alternatief is wervelstroomdemping. In een (elektrisch) geleidend materiaal ontstaat een wervelstroom als er een verandering is van het magnetisch veld. Die verandering kan men op-

wekken door bijvoorbeeld permanente magneten over een koperen strip te bewegen. Dan zal er een wervelstroom (Eddy current) gaan lopen door de koperen strip. Deze stroom genereert op zijn beurt een Lorentz-kracht die loodrecht staat op zowel het magnetisch veld als de stroomrichting; die kracht zal de verandering van het magnetisch veld proberen tegen te gaan. Oftewel, de beweging wordt afgeremd. Voor relatief lage snelheden geldt dat deze kracht lineair toeneemt met de bewegingssnelheid. Een bewegend magnetisch veld door een statisch geleidend materiaal (of een bewegend geleidend materiaal in een statisch magnetisch veld) kan dus zorgen voor viskeuze demping. Zo lang de snelheden laag genoeg blijven, zal een Eddy-current demper in het lineaire regime blijven.

Daarnaast is er geen contact tussen de permanente magneten en de elektrische geleider. Zo'n oplossing kan dus worden toegepast in omgevingen waar extreme eisen gelden voor de reinheid (bijvoorbeeld in cleanrooms of in optische systemen) of geen uitgassende materialen kunnen worden gebruikt (zoals in vacuümtoepassingen). Vanwege het contactloze ontwerp is er geen wrijving, en dus ook geen stick-slip.

Eddy-current demonstrator

Zo kreeg Nobleo inspiratie voor de Eddy-current demonstrator. Deze is gemaakt met een koperen strip en magneten die vanuit andere projecten beschikbaar waren gekomen, en een constructie die in kunststof is geprint. Het is een educatief middel dat duidelijk voelbaar maakt wat de verschillende effecten zijn van stijfheid, sterkte, demping en wrijving.

Het nadeel van Eddy-current dempers is dat magneten en geleidend materiaal, bijvoorbeeld koper, veel volume innemen. Die extra ruimte is er niet altijd bij hightech toepassingen. Daarnaast is de dichtheid van koper en materialen voor permanente magneten (zoals NdFeB) doorgaans hoog.

(Niet) nieuw

Geen van de hier beschreven bepalende ontwerpaspecten is nieuw. Alles in de demonstrator is al eens bedacht, opgeschreven of zelfs gepatenteerd. Nieuw in deze educatieve demonstrator, die ideeën uit het hightech systems engineering programma van Nobleo toont, is de combinatie van al deze aspecten. ◉

NOBLEO-TECHNOLOGY.NL



engineersonline.nl
Hét online platform voor engineers

Vind de juiste
engineer voor uw
vacature met
Engineersonline.nl

Dagelijks bezocht door duizenden
engineering professionals.

vacatures.engineersonline.nl