

# Machinestructuren voor precisiesystemen

*Bij het ontwerp van een precisiemachine is het frame vaak nog een ondergeschoven kindje. Ten onrechte, want meer nog dan bij gewone machines is een 'goed' frame van wezenlijk belang voor de nauwkeurigheid van een precisiemachine. Een van de grootste ontwerpopgaves is de combinatie van functies: het doorleiden van de statische en dynamische krachten en het tegelijkertijd handhaven van een zeer hoge geometrische nauwkeurigheid. Op grond van enkele basisconcepten zijn verschillende maatregelen mogelijk om tot een precisieframe te komen. Zo kan het functioneren van een machineframe worden verbeterd door het scheiden van de twee functies krachtdoorleiding en positiereferentie. Trillingsisolatie kan de interne vervorming van de machine als gevolg van uitwendige dynamische belasting minimaliseren. Ontwerpvorbelden laten zien dat de beheersing van deze basisconcepten heeft geleid tot staaltjes van hightech machinebouw in Nederland.*

• **Herman Soemers** •

**N**emen we een nauwkeurige bewerkingsmachine als voorbeeld, dan is de relatieve positie van het gereedschap en het werkstuk van het grootste belang. De eerste functie van de machinestructuur is dan het dienen als referentie voor de posities van het werkstuk, respectievelijk het gereedschap. De structuur mag de positiemeting niet beïnvloeden, en dient dus in hoge mate vormvast te zijn. De tweede functie van de machinestructuur is het doorleiden van de krachten, de statische (het gewicht) en de dynamische: proceskrachten, versnellingskrachten ten gevolge van bewegingen, krachten uit de omgeving overgedragen door de fundatie en krachten als gevolg van akoestische drukvariaties (van belang voor machines met nanometerprecisie). Tot slot dient een machinestructuur nog ruimte te bieden voor aanvullende functies, zoals de elektrische voeding, een drukvat en dergelijke. De beide hoofdfuncties van de structuur, krachtdoorleiding en positiereferentie, staan op gespannen voet

met elkaar. Het doorleiden van krachten gaat namelijk, onvermijdelijk, gepaard met elastische vervormingen en die tasten op hun beurt de nauwkeurigheid van de referentie aan.

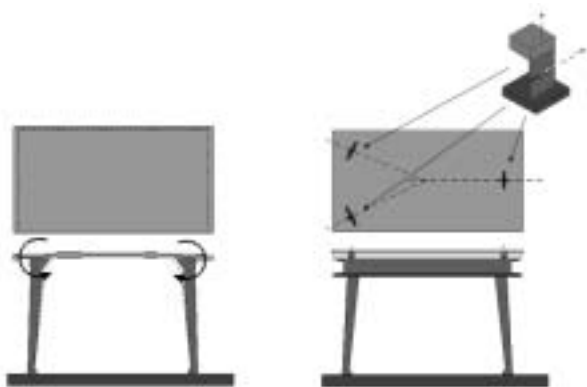
## **Opties**

Een eerste, voor de hand liggende optie om de strijdigheid van de functies op te lossen is het zo hoog mogelijk opvoeren van de stijfheid van de structuur. Dit kan in uiteenlopende uitvoeringsvormen. Een tweede optie is een directe meting tussen het gereedschap en het werkstuk, waarbij het frame slechts dient als object waarop de servo gemonteerd is die de corrigerende beweging kan maken. Een derde mogelijkheid is het frame voor de krachtdoorleiding te scheiden van het zogeheten metrologieframe. Een vierde optie is het meten van de belastingen in het frame, waarna een actieve vervorming van het frame wordt geactueerd om de vervormingen ten gevolge van de belasting tegen te werken (via

bijvoorbeeld actieve demping). Deze optie is geschikt voor relatief hoge frequenties en daarom mogelijk een antwoord op akoestische belastingen. De vijfde mogelijkheid betreft (actieve) trillingsisolatie als middel om omgevingstrillingen buiten de machinestructuur te houden.

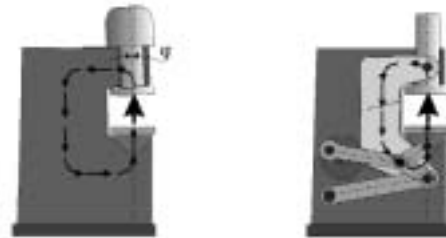
### Scheiding van functies

Aan meerdere opties ligt het concept van scheiding van functies ten grondslag. Neem het voorbeeld van het tafelblad; zie Afbeelding 1. Dat moet de (soms onbedoelde) krachten doorleiden die op de tafelpoten worden uitgeoefend, en tegelijk dienen als vlakke ondergrond. Als iemand tegen de poten stoot of de vloer zet uit ten opzichte van het tafelblad, dan zal het blad echter vervormen, bijvoorbeeld bol gaan staan. Een oplossing voor dit probleem vormt een apart blad dat op een statisch bepaalde manier bovenop de tafel wordt bevestigd, bijvoorbeeld met drie bladveren zoals aangegeven in Afbeelding 1. Dan wordt de vervorming niet doorgegeven aan dit 'boventafelblad', dat daardoor puur als positiepreferentie (vlakke ondergrond) kan dienen.



Afbeelding 1. Ten gevolge van krachtdoorleiding (links) kan een tafelblad vervormen, waardoor het ongeschikt is als positiepreferentie (vlakke ondergrond). Rechts zijn de functies gescheiden en kan het bovenste tafelblad wel als vlakke ondergrond dienen.

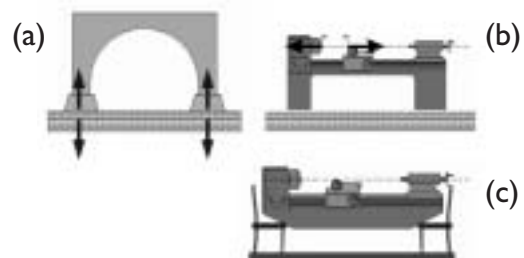
Een ander voorbeeld van scheiding van de functies krachtdoorleiding en positiepreferentie is de May excenterpers; zie Afbeelding 2. Bij een conventionele pers beïnvloedt het aanbrengen van de perskracht de positionering c.q. oriëntatie van de twee persvlakken (Afbeelding 2, links: de hoek  $\phi$  verandert ten gevolge van de perskracht). In ambachtelijke taal: "door het kracht zetten raakt de pers ontzet". In de constructie van de May excenterpers zorgt het excentermechanisme ervoor dat de perskracht geen invloed heeft op de positionering: de pers raakt niet meer ontzet.



Afbeelding 2. Een conventionele pers (links) zonder en een May excenterpers (rechts) met scheiding van de functies krachtoverdracht en positionering.

### Stijfheid

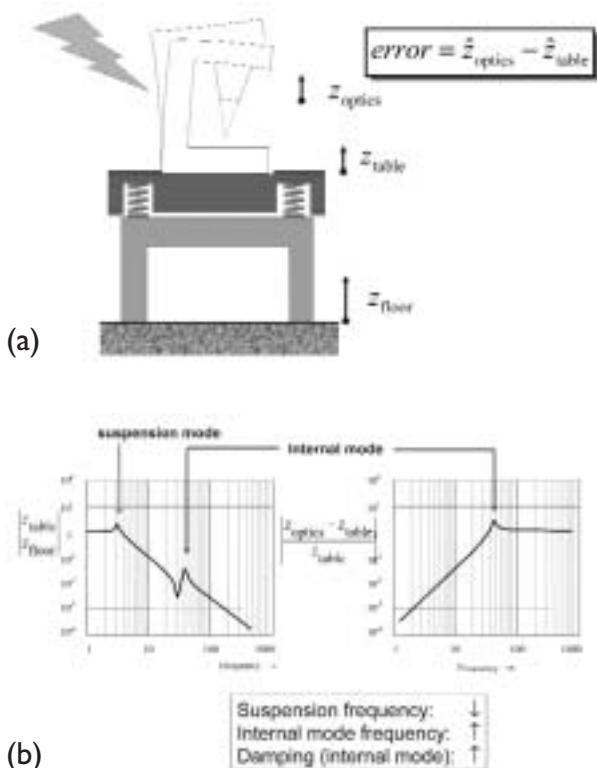
Het vergroten van de stijfheid heeft tot doel de vervorming als gevolg van krachtdoorleiding zo klein mogelijk te maken. Vergroting van stijfheid werkt bij gering materiaalgebruik in bijna alle gevallen positief. Het gebruik van gesloten kokers en doosconstructies draagt hieraan in belangrijke mate bij. Bij een bewerkingsmachine gaat het om de relatieve positie van gereedschap en werkstuk, dus om de nauwkeurigheid daartussen. Die wordt beïnvloed door de krachten die ze op elkaar uitoefenen. De stijfheid moet dan ook in het machinebed tussen gereedschap en werkstuk worden aangebracht en niet in de verankering van de machine op de ondergrond; zie Afbeelding 3. Deze verankering is voor de nauwkeurigheid van de machine niet direct relevant en kan dan ook 'licht' worden uitgevoerd (vergelijk de tafelbladondersteuning van Afbeelding 1). Het materiaal dat eerst gebruikt werd voor de poten is als het ware toegevoegd aan de bedconstructie ter verhoging van de interne stijfheid. De keukenstoelen geven op provocerende wijze aan waar het hier eigenlijk om gaat (Afbeelding 3c).



Afbeelding 3. De relevante krachten bij een bewerkingsmachine zijn die tussen gereedschap en werkstuk en niet die tussen machine en ondergrond. De stijfheid moet daarom niet worden aangebracht in de verankering op de ondergrond, zoals bij (a) en (b) (die kan 'licht' worden uitgevoerd), maar juist in het machinebed tussen gereedschap en werkstuk, zoals bij (c).

## Trillingsisolatie

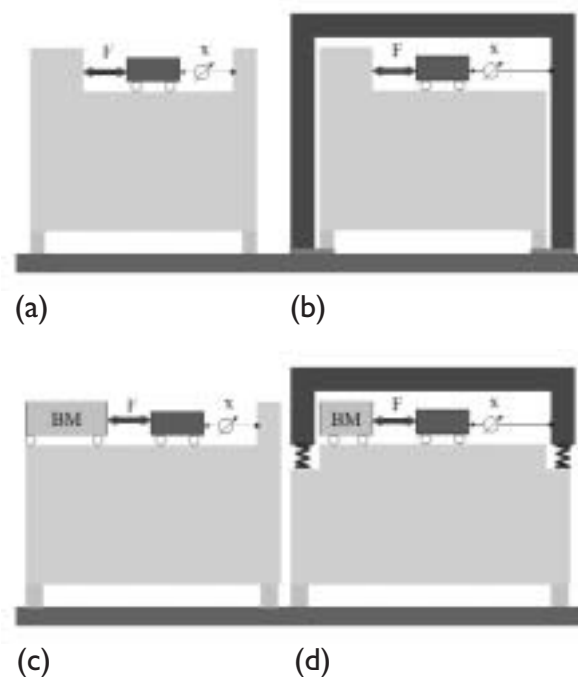
Bovenstaande concepten voor functiescheiding hebben betrekking op statische krachten. Dynamische krachten hebben evenzeer invloed op de nauwkeurigheid van machinestructuren. Daar ligt het accent in eerste instantie veelal op het afschermen van de invloed van trillingen van de omgeving, met name de ondergrond. Meetopstellingen worden daarom vaak op een granieten tafel opgebouwd, die vervolgens met veerpotten dynamisch van de ondergrond wordt gescheiden. Op deze manier worden trillingen van buiten inderdaad gefilterd, en daarmee worden de amplitudes van de (hoogfrequente) interne trillingsmodes onderdrukt; zie Afbeelding 4. Resultaat van een dynamische verstoring is dat er zich een fout c.q. onnauwkeurigheid voordoet als gevolg van de interne vervorming van het meetinstrument. In veel gevallen verdient het daarom aanbeveling een slappe ondersteuning te combineren met voldoende demping in de structuur zelf.



Afbeelding 4. Isolatie van trillingen van de omgeving, geïllustreerd voor een optisch meetinstrument.

- (a) De relevante grootte is de fout in de relatieve positie van meetoptiek ten opzichte van de tafel.  
 (b) Omgevingstrillingen worden weggefilterd (links), en daarmee wordt de interne trillingsmode verminderd aangestoten (rechts).

## Alternatieve frameconcepten



Afbeelding 5. Alternatieve frameconcepten.

- (a) Het traditionele frame, dat zowel de krachtdoorleiding ( $F$ ) als de positiereferentie ( $x$ ) verzorgt.  
 (b) Een scheiding tussen positie- en krachtenframe.  
 (c) In plaats van een krachtenframe wordt een balansmassa toegepast, die door zijn traagheid versnellingskrachten opvangt.  
 (d) Naast de balansmassa om trillingen te onderdrukken, wordt een positie (metro)frame toegepast dat wordt ondersteund door trillingsisolatoren.

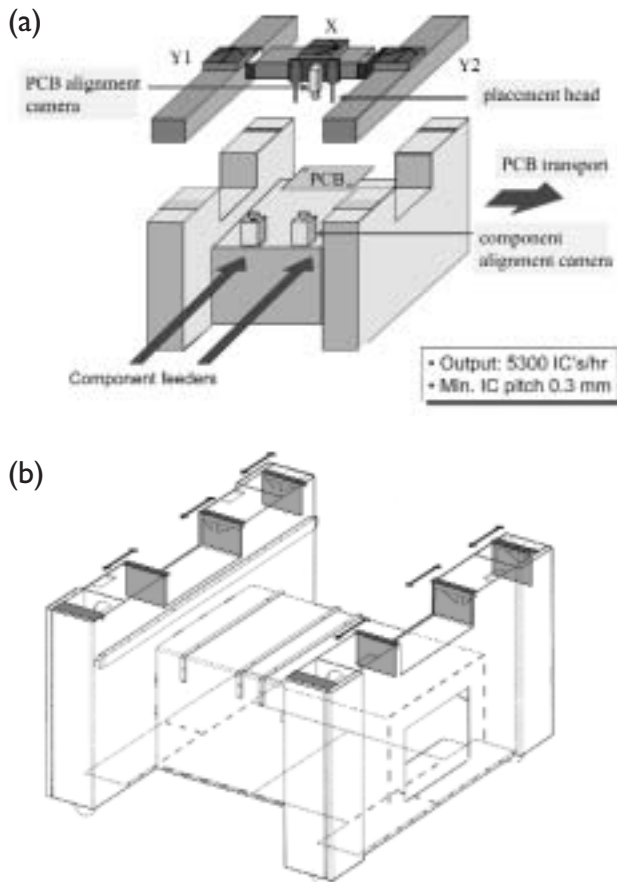
## Voorbeelden

Uit de praktijk van Philips Applied Technologies komt een aantal voorbeelden van toepassing van bovenstaande concepten.

### AQ component mouter

Om de AQ component mouter van Assembléon, plaatsingsmachine voor componenten op printed circuitboards (PCB's), zijn gewenste snelheid te geven, waren aandrijfkrachten groter dan 1000 N nodig. Om de inwendige vervormingen zo laag mogelijk te houden, is in dit geval voor een traditioneel frameconcept gekozen, waarbij wel een zeer hoge stijfheid-massaverhouding is gerealiseerd door de combinatie van kokers en uit dunne staalplaat opgebouwde structuren (zie Afbeelding 6). De lineaire motorassen zijn op het frame gemonteerd op een wijze die lineaire uitzetting

van de assen toelaat met behoud van hoge stijfheid in aandrijfrichting. Deze constructie voorkomt 'kromtrekken' bij opwarming als gevolg van de motordissipatie.



Afbeelding 6. De AQ component mounter van Assembléon.

(a) Het frameconcept.

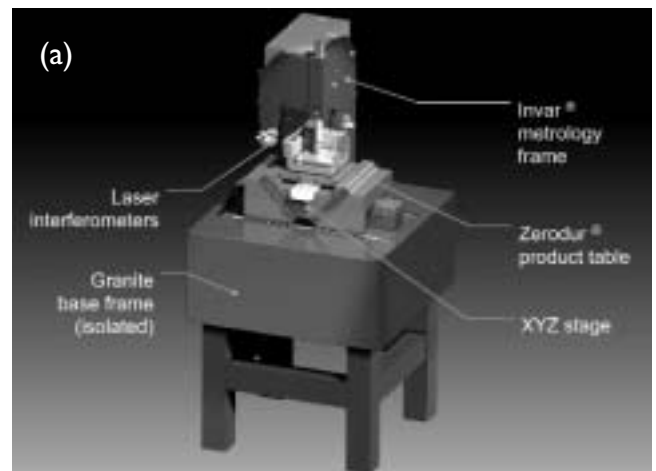
(b) Dunwandige kokers zorgen voor hoge stijfheid. Speciale platen maken (thermische) uitzetting van de lineaire assen mogelijk.

**ISARA**

De 3-D coördinatenmeetmachine ISARA van IBS Precision Engineering onderscheidt zich onder meer door zijn hoge nauwkeurigheid. Doordat de machine bedoeld is voor het meten aan relatief kleine onderdelen, was het mogelijk om zeer consequent het Abbe-meetprincipe door te voeren. Drie loodrechte interferometers zijn 'exact' gericht op de tip van de (stilstaande) meettaster, terwijl het te meten object op een tafel met drie onderling loodrechte spiegelvlakken bewogen wordt door een manipulator (Lorentz-actuatoren).

Naast het Abbe-principe en de taster heeft vooral de stabiliteit van de meetreferentie, gedurende de tijdsduur van een

meting, veel aandacht gekregen. Dit moest echter wel bereikt worden tegen beperkte kosten. Het uit twee platen Invar® bestaande metrologieframe is via een omhulling (vergelijk een thermoskan) geïsoleerd van met name thermische verstoringen uit de omgeving. Een machine-omhulling versterkt die functie nogmaals. De interne (statische bepaalde) ophanging van het metroframe is aan een zeer zware (ook van omhulling voorziene) aluminiumkolom voor goede temperatuurvereffening en hoge warmtecapaciteit. Dit geheel is samen met de bewegingsstage gemonteerd op een op trillingsisolatoren rustende granieten plaat.



(b)



Afbeelding 7. De ISARA UP coördinatenmeetmachine (ontwerp: Theo Ruij).

(a) 30 nm volumetrische meetonzekerheid.

(b) Principe: laserinterferometers zijn verbonden aan een vast (metrologie)frame; de zerodur spiegeltafel kan bewegen. Metingen volgens het Abbe-principe vinden plaats in de X-, Y- en Z-richting, met een bereik van 100 x 100 x 40 mm<sup>3</sup>.

## Waferscanners

Bij waferscanners van ASML is functiescheiding via framescheiding zéér ver doorgevoerd. Zo heeft een machine (zie Afbeelding 8) drie ‘verdiepingen’. In de bovenste wordt het reticle (masker) bewogen, in de middelste verdieping bevindt zich de lenskolom als centraal deel in het metroframe. Het op zeer geavanceerde trillingsisolatoren geplaatste metroframe dient als meetreferentie voor de wafer- en reticlebeweging. In de onderste ‘verdieping’ zijn de waferstages ondergebracht, waarbij één waferstage dient voor metingen aan ligging en vlakheid van de wafer terwijl de andere stage de wafer onder de lens door beweegt voor het feitelijke belichtingsproces.

Om productiesnelheden tot honderd wafers en meer per uur mogelijk te maken, zijn zeer grote versnellingen en daarmee ook (helaas) grote krachten nodig. Onderlinge beïnvloeding van de stages en doorleiden van krachten naar het frame worden sterk gereduceerd door elke stage te voorzien van een balansmassa (de balansmassa van de waferstage beweegt in x, y en  $R_z$ ). Verder is er bij elke stage nog een scheiding tussen ‘lange slag’ en ‘korte slag’, waarbij de eer-

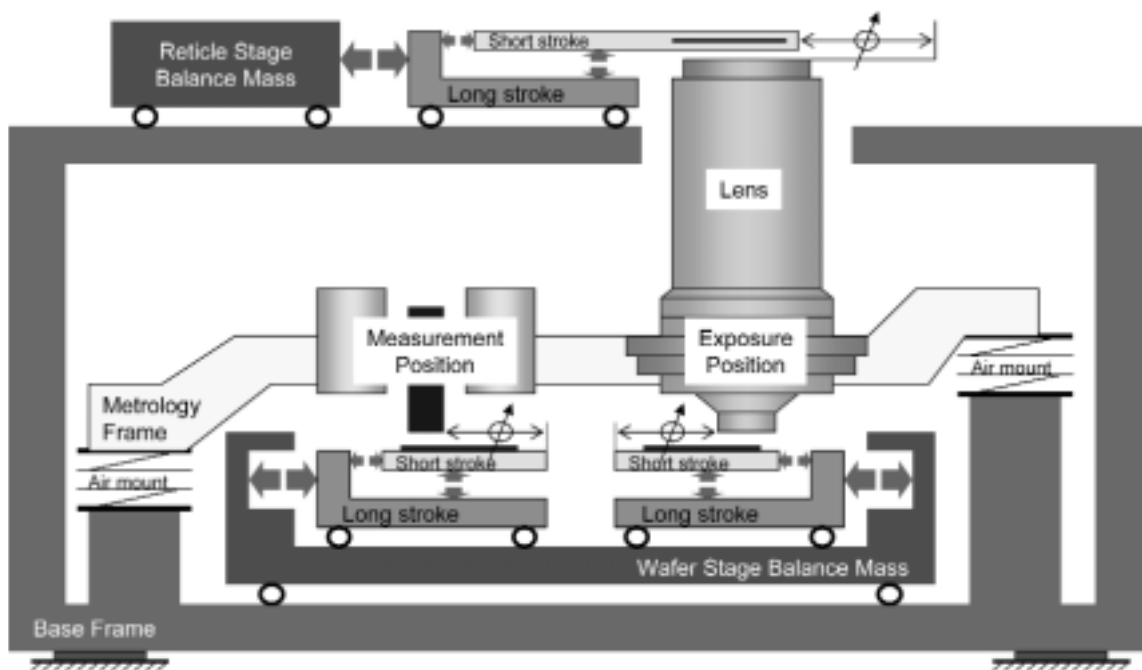
ste vooral dient om de tweede trap, de korte slag, een zeer klein werkbereik te geven: een noodzakelijke voorwaarde voor een uiterst nauwkeurige manipulator. De scheiding tussen korte en lange slag is via een 6-D Lorentz-motor. Omdat de korte-slagmanipulator een positieregeling heeft met het metrologieframe als referentie, de lange-slagmanipulator alleen maar zorgt dat de korte slag in het midden van zijn werkveld blijft, en de Lorentz-motoren niet reageren op kleine positievariaties tussen korte en lange slag, kan deze configuratie als een uiterst effectief trillingsfilter worden beschouwd.

## Auteursnoot

Herman Soemers is senior designer mechatronische systemen bij Philips Applied Technologies en hoogleraar mechatronisch ontwerpen aan de Universiteit Twente. Dit artikel is gebaseerd op zijn hoofdlesing tijdens de Precisiebeurs 2005.

## Informatie

[h.m.j.soemers@philips.com](mailto:h.m.j.soemers@philips.com)



Afbeelding 8. Een voorbeeld van een frameconcept voor een waferscanner van ASML.