

# Een rechtgeleiding

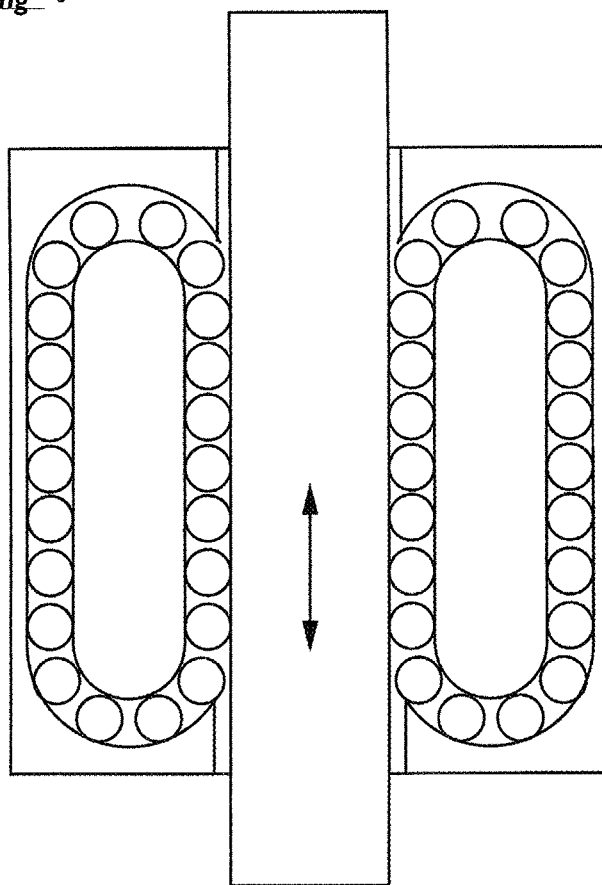
**Bekende rechtgeleidingen zijn van het type kogelkringloop [1] (afbeelding 1), of het zijn lineaire kogellagers [2] (afbeelding 2). Bij het eerstgenoemde type stuwen de kogels elkaar voort door een kanaal; in het tweede is een kooi onmisbaar om de kogels op afstand te houden. Als gevolg van kruip zal de kogeltrein tijdens het bedrijf zich in een voorkeursrichting bewegen, zodat aanslagen aan de uiteinden nodig zijn om de kogels binnenboord te houden. Wrijving is derhalve niet te vermijden, ondanks dat beide typen rechtgeleiding gebaseerd zijn op het rollen. Het sterk niet-lineaire karakter van wrijving maakt het nauwkeurig positioneren met behulp van een regellus moeilijk.**

• M.P. Koster, M.A.M. Grooten, L.A.M. de Jong •

Het concept elastosliding [3] brengt in dit opzicht een doorbraak. Hier is sprake van wrijvingsloos rollen zonder kooi en zonder dat de kogels elkaar raken, noch enige andere bron van wrijving. Hoewel kruip als bijverschijnsel van het rollen aanwezig blijft, zal de elastosliding zijn kogels niet verliezen dankzij het toepassen van licht hellende kogelbanen en voorgespannen kogels. Als gevolg van de toegepaste voorspanningen is de rechtgeleiding niet bijzonder stijf. Daarom moet aandacht worden besteed aan het dynamische gedrag van de elastosliding als deze wordt opgenomen in een positiering.

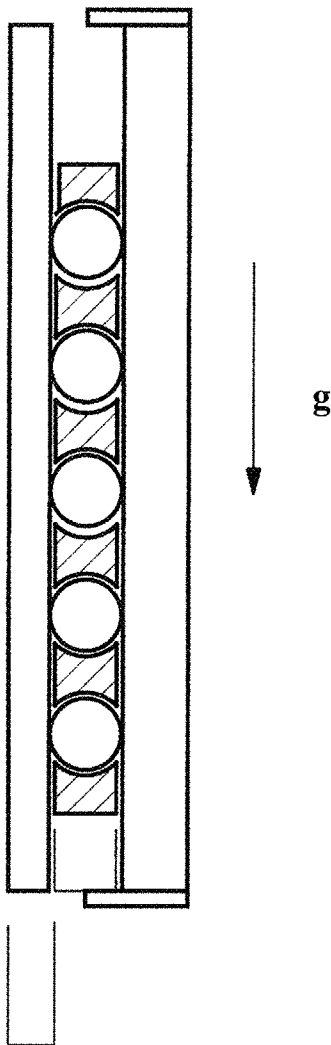
## Kruip

Als een kogel is geklemd tussen twee loopbanen van lichamen die ten opzichte van elkaar een rechtlijnige beweging maken, dan toont een eenvoudige kinematische beschouwing aan dat de kogel een slag maakt gelijk aan de helft van de slag tussen de twee lichamen. Echter, een beschouwing van de in contact zijnde elastische lichamen leert dat in het contactoppervlak geen zuiver rollen optreedt, maar dat er sprake is van een lichte slip. Deze *microslip* hangt af van de doorgeleide *normaalkracht*, van de uitgeoefende (tangentiële) *tractiekracht* en van de *wrijvingscoëfficiënt* [4]. Als de relevante parameters exact gelijk zouden zijn voor beide bewegingsrichtingen



Afbeelding 1. Kogelkringloop rechtgeleiding.

# zonder wrijving en speling



Afbeelding 2 Lineair kogellager.

tingen, dan zou er geen reden zijn voor een resulterende *kruip* na afloop van een aantal heen-en-weer-bewegingen van de rechtgeleiding. In de praktijk is dit niet het geval. Een verschil in de versnellingen veroorzaakt een verschil in tractiekracht. Bijvoorbeeld, opgesteld in de verticale richting, is de zwaartekracht op de kogel de oorzaak van het verschil. Er zal dan netto een benedenwaarts gerichte *kruip* zijn. Ten slotte zal de kooi van afbeelding 2 met een zekere regelmaat tegen de eindaanslag tikken. Op die momenten treedt zelfs macroslip in werking om de kogelrein het verder wegzakken te belemmeren.

## Stabilisatie van kruip

Als de *kruip* ongehinderd kon doorgaan, dan zou de kogelrein van afbeelding 2 uiteindelijk terechtkomen op de plaats waar zijn potentiële energie een minimum vertoont. In het zwaartekrachtsveld is dat het middelpunt van de aarde; een onpraktische plaats! Het concept van een minimum in de potentiële energie is echter heel bruikbaar als een (lokaal) minimum binnen de constructie kan worden gerealiseerd. De resulterende *kruip* zal steeds naar dit minimum gericht zijn. Op deze wijze kunnen de kogels binnenboord worden gehouden.

Een licht hellende loopbaan met het diepste punt in het midden van de baan, zoals in afbeelding 3, schept een minimum in de potentiële energie van een elastisch voorgespannen kogel in het zwaarteveld.

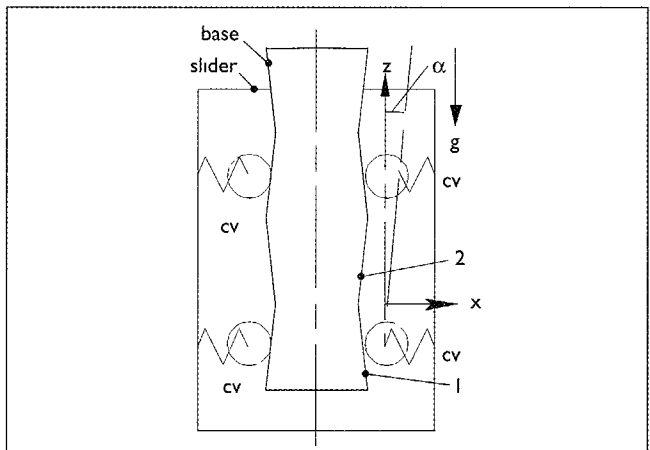
$U$  is de potentiële energie van de voorspanveer ( $c_v$ )  $F_x$ , als de voorspankracht als  $x=0$ . De hellingshoek is  $\alpha$  ( $\ll 1$ ),  $m$  is de massa van een kogel en  $g$  is de versnelling van de zwaartekracht.

In een stand ( $x$ ) is de veerkracht gelijk aan:

$$F_x(x) = F_x + c_v x \quad (1)$$

In contact met het deel (1) van de loopbaan (afbeelding 3) is de verandering van de potentiële energie als gevolg van de verplaatsing van de kogel gelijk aan:

$$\begin{aligned} dU &= mg \cdot dz + F_x(x) \cdot dx \\ dx &= -\alpha \cdot dz \end{aligned} \quad (2)$$



Afbeelding 3 Hellende loopbanen.

Tezamen met (1) en het verwaarlozen van de kleine term met  $(\alpha^2)$  ontstaat:

$$\frac{dU}{dz} = mg - F_x \alpha$$

In deel (1) van de baan geldt dat  $(dU/dz < 0)$  moet zijn om te bereiken dat  $U$  een minimum vertoont ter plaats  $z=0$ . Als nu wordt geschreven:

$$|F_x \alpha| = p \cdot |mg| \quad (3)$$

dan wordt aan deze voorwaarde voldaan als:  $p > 1$

Er is een grens aan  $(F_x)$  in verband met de toelaatbare contactdruk volgens Hertz tussen de kogel en de loopbaan. Derhalve worden de volgende waarden gekozen:

$$p=10, \alpha=10^{-2}$$

### Aandrijfstroom

De elastoslider wordt aangedreven door middel van een lineaire gelijkstroommotor. Er is een stroom nodig om de wagen buiten de minimumenergiepositie ( $z=0$ ) te houden. De voorspankracht in de stand  $z=0$  is gelijk aan:

$$F_x(0) = c_v \cdot x(0)$$

waarin  $(c_v)$  de stijfheid is van een helft van de wagen tot aan zijn hartlijn, gerekend per kogel en  $(x(0))$  de elastische vervorming van de slider ten opzichte van zijn hartlijn, als hij staat in de stand  $x=0$ .

De aandrijfkracht per voorgespannen kogel op de helling is gelijk aan:

$$F_z = \alpha \cdot F_x$$

Terugkijkend naar de uitdrukking (1), in verband met de helling noterend dat:

$$x = \pm \alpha \cdot z$$

en er bovendien rekening mee houdend dat de kogel maar de helft van de weg van de slede aflegt, vinden we als aandrijfkracht voor de slede met 4 kogels, evenwijdig aan het zwaarteveld:

$$F_z = 4 \{ \pm \alpha \cdot c_v \cdot x(0) \pm \alpha^2 c_v \cdot z/2 \} + m_v \cdot g \quad (4)$$

Hier is  $(m_s)$  de massa van de wagen plus 4 maal de helft van een kogel.

Als de wrijving wordt verwaarloosd kan de aandrijf-stroom worden geschat als de karakteristiek van de lineaire d.c.motor bekend is. In het gebruiksgebied is deze lineair met een motorconstante  $(k_m)$ .

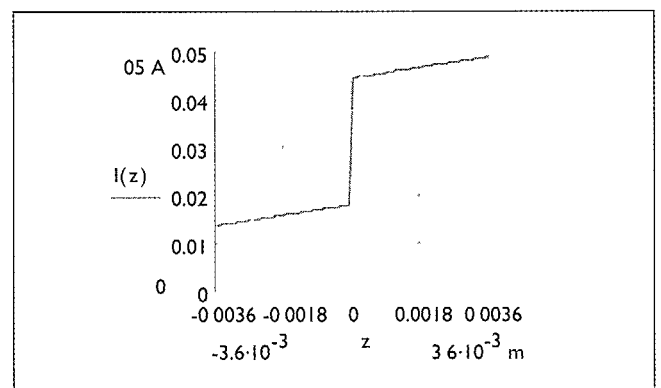
$$I = F_z / k_m$$

Voor het geval

$$\alpha=7,5 \cdot E-3 \text{ rad}, c_v=11 \text{ N/mm}, x(0)=0,04 \text{ mm}, m_s=3,2 \cdot E-3 \text{ kg en } k_m=1 \text{ N/A}$$

is het resultaat afgebeeld in afbeelding 4.

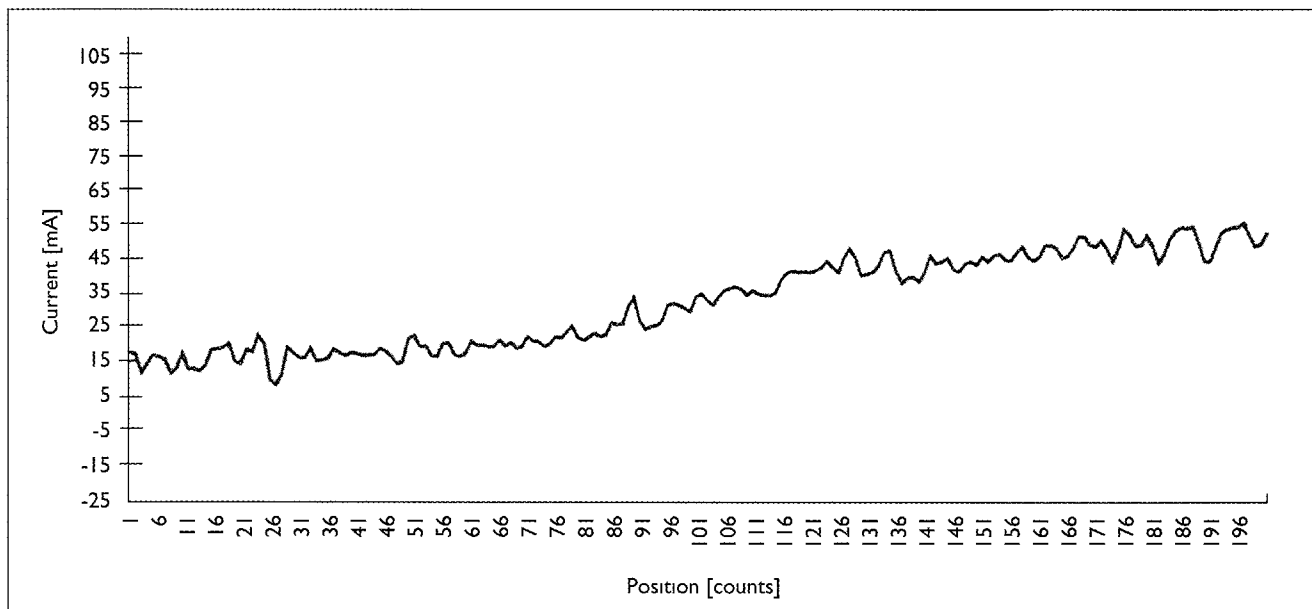
Het belangrijkste verschil met de gemeten stroom als functie van de plaats (zie afbeelding 5) is de overgang van de ene helling naar de andere. In theorie vindt deze voor alle 4 de kogels tegelijkertijd plaats. In werkelijkheid zal dat niet het geval zijn, zodat er een 'uitsmeren' plaatsvindt. Interessant zijn vooral de flauw hellende delen van de karakteristieken waar de berekende en de gemeten hellingen goed met elkaar overeenkomen. Omdat in afbeelding 4 geen wrijving is meegerekend kan verder uit vergelijking van de twee karakteristieken worden vastgesteld dat wrijving een verwaarloosbare rol speelt.



Afbeelding 4. Berekende aandrijfstroom.

### De stijfheid van de elastoslider

In deze toepassing draagt de wagen een magneetkop, een lineaire servomotor en een positieopnemer. De kop maakt contact met de magneetband. Bij het vinden en het volgen van een spoor op de band beweegt de kop in de z-richting, dwars op de bewegingsrichting van de band. De vereiste opzoektijd van een spoor, en de toe-

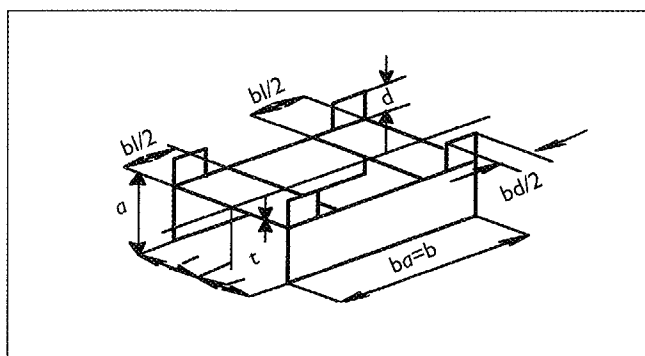


Afbeelding 5 Gemeten aandrijfstromen

laatbare positiefout daarbij, stellen de eis dat de *bandbreedte* van de positierservo van de kop minstens 400 Hz moet zijn. Binnen de beperkte plaatsruimte kon geen wagen worden ontworpen waarin de relatief lage voorspanstijfheid,

$$c_v = \frac{a^2}{EI} \left\{ \frac{a}{3\alpha} + \frac{l}{(\lambda/l) + (4\delta/d)} \right\} \quad (5)$$

met  $\alpha = b_a / b$ ,  $\delta = b_d / b$ ,  $\lambda = b_l / b$  en  $I = bt^3 / 12$  (afbeelding 6),



Afbeelding 6. Elastisch model van het voorspanelement

kon worden gecombineerd met een relatief hoge stijfheid bij het onderling verbinden van de kop, de motor en de

sensor. In afbeelding 7a is te zien dat deze objecten aan een stijf frame zijn verbonden. Dit frame wordt relatief slap ondersteund door de elastosliding. De stijfheden van de elastosliding in de x- en de y-richting zijn respectievelijk

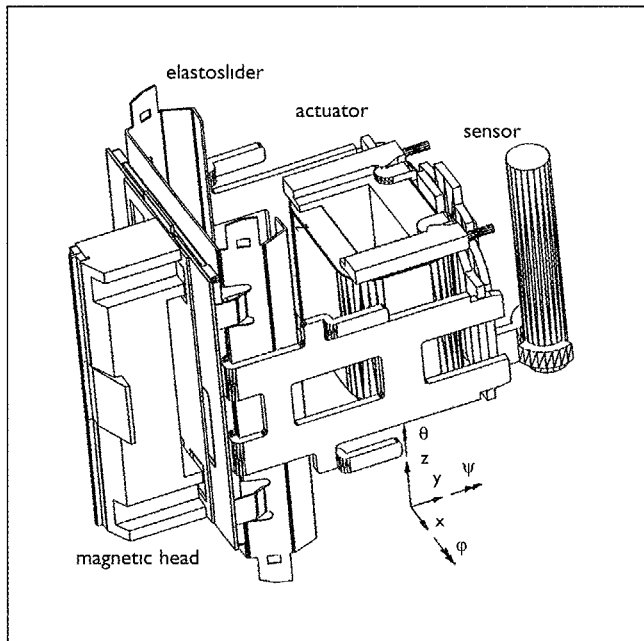
$$\begin{aligned} c_x &\approx 0.9c_v \\ c_y &\approx 2.7c_v \end{aligned}$$

per kogel, in de stand ( $z=0$ ). De stijfheid ( $c_v$ ) zou kunnen worden vergroot door het spitsen maken van de V-vormige dwarsdoorsnede van de loopbanen (afbeelding 7b). Dit zou een toename van de 'spin' van de kogels, en derhalve meer wrijving tot gevolg hebben.

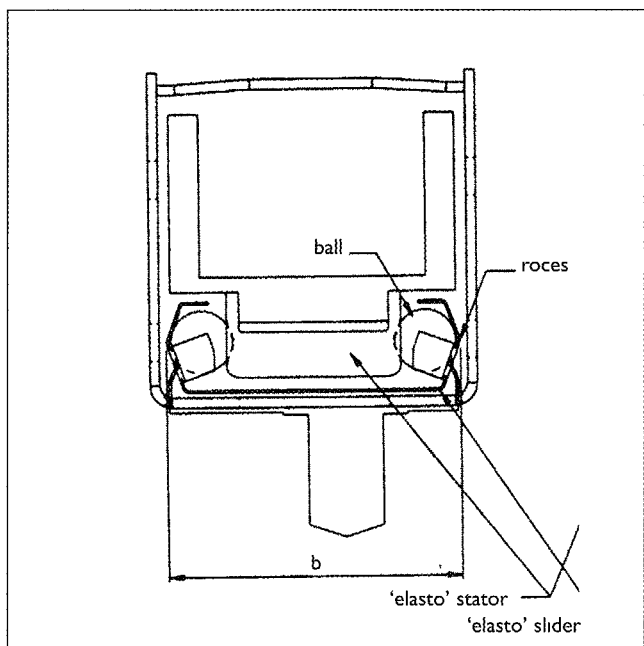
Het resultaat is nu dat de rechtgeleiding van het type elastosliding volkomen vrij van speling is, en dat de wrijving is teruggebracht tot extreem lage waarden, vanwege het bijna zuiver rollen, maar dat de stijfheid betrekkelijk matig is.

Deze matige stijfheid valt helaas samen met een andere onhebbelijkheid van de wagen, namelijk dat de top van de magneetkop, de werklijn van de aandrijfkraft, het massamiddelpunt van de wagen en de plaats van de sensor niet samenvallen. Deze omstandigheid maakt dat bijzondere aandacht moet worden gegeven aan de dynamica van het servosysteem, waarvan de wagen deel uitmaakt. Hierna zal worden besproken dat de rotatiervorm om de x-as de stabiliteit, de regelbaarheid en de prestatie van het servosysteem bedreigt.

Afbeelding 7 De linear beweegbare magneetkop.



Afbeelding 7a. Stijve wagen met componenten.



Afbeelding 7b. Kogelbanen met V-vormige dwarsdoorsneden in de stator en in de slider.

**Bandbreedte**

De prestatie van een positieervo wordt in veel gevallen beoordeeld aan zijn vermogen om snel te bewegen en toch nauwkeurig op de bedoelde plaats tot stilstand te komen. Naast het bewegingsvoorschrift  $(h(t))$ , spelen de beschikbare tijd  $(t_m)$ , de effectief bewegende massa  $(m)$  en de systeemstijfheid  $(c)$  daarbij een rol. In het geval dat  $(h(t))$  bijvoorbeeld een tweedegraadsfunctie is, geldt voor de plaatsfout bij aankomst [5]

$$u_0 = 0,05 \left[ \frac{2\pi \sqrt{m}}{t_m \sqrt{c}} \right]^2$$

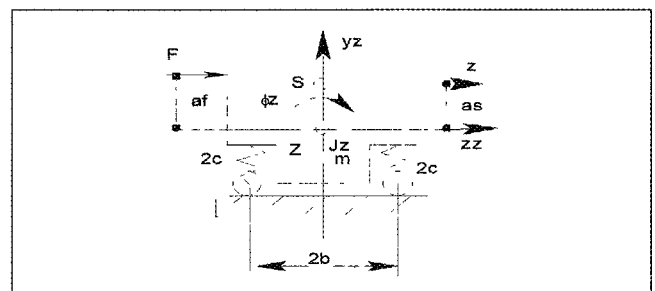
Dat wil zeggen, het systeem moet onder andere licht en stijf zijn om deze prestatie te verrichten. Deze beide eigenschappen kunnen worden uitgedrukt in de bandbreedte:

$$BB = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \text{ [Hz]}$$

Een hoge bandbreedte wijst op een systeem dat snel en nauwkeurig positioneert!

**Systeemdynamica**

In afbeelding 8 is afgebeeld: het dynamische model van een linear bewegende wagen, massa  $(m)$ , massa traagheidsmoment  $(J_z)$  ten opzichte van het massamiddelpunt,  $(Z)$ , elastisch geleid met een stijfheid  $(c)$  per kogel. De wagen heeft 3 graden van vrijheid,  $\phi_z$ ,  $y_z$  en  $z_z$ . De afstand van de werklijn van de aandrijfkraft  $(F)$  tot  $(Z)$  is  $a_f$ , de afstand van de sensor  $(S)$  tot  $(Z)$  is  $a_s$ . De  $y$ -as is een symmetrie-as. Daarom is de beweging in de  $y$ -richting niet gekoppeld aan de beide andere. Omdat de stijfheid in de  $z$ -richting gelijk aan nul is, bestaat er ook geen koppeling tussen de verplaatsing  $(z)$  en de rotatie  $(\phi_z)$ .



Afbeelding 8 Dynamisch model van de wagen.

Voor hetgeen er in de rijrichting gebeurt, zijn twee bewegingsvergelijkingen interessant: die voor de rotatie en die voor de z-beweging:

$$J_z \ddot{\phi}_z = a_f - k\phi_z \quad (6)$$

$$m\ddot{z} = F \quad (7)$$

Omdat  $z = z_z + \phi_z a_s$

kan, met het invoeren van de (Laplace-)variabele,  $s^2$ , in plaats van  $=d^2/dt^2$ , de overdrachtsfunctie worden opgeschreven die het verband weergeeft tussen de door de sensor gemeten positie ( $z$ ) en de aandrijfkraft ( $F$ ).

$$\frac{z}{F}(s) = \frac{J_z + ma_f a_s}{mJ_z} \frac{s^2 + \omega_a^2}{s^2(s^2 + \omega_e^2)} \quad (8)$$

waarin:

$$\omega_a^2 = \frac{k}{J_z + ma_f a_s} \text{ en } \omega_e^2 = \frac{k}{J_z} \quad (9) (10)$$

De rotatiestijfheid is gelijk aan:  $k = 8cb^2$

Uit de overdrachtsfunctie (8) kan men onder andere aflezen wat het gedrag van de wagen is als de kracht ( $F$ ) sinusvormig in de tijd varieert. Voor de *aandrijffrequentie* ( $\omega$ ) geldt dan namelijk dat  $\omega^2 = -s^2$ .

Voor dit *harmonische* geval pleegt men de amplitudeverhouding ( $z/F$ ) en het faseverschil tussen ( $z$ ) en ( $F$ ) af te beelden in de zogenaamde *frequentie-reponsiefunctie* (*frf*). Als de aandrijffrequentie ( $\omega$ ) groeit en op zeker ogenblik gelijk is aan ( $\omega_a$ ) dan is  $z=0$ , ongeacht de grootte van ( $F$ ). Ter plaatse van de sensor valt geen beweging te meten. De *teller* van (8) is gelijk aan nul; ( $\omega=\omega_a$ ) noemt men een *nulpunt*. Dit nulpunt is afgebeeld in het bovenste plaatje van de frf van afbeelding 9.

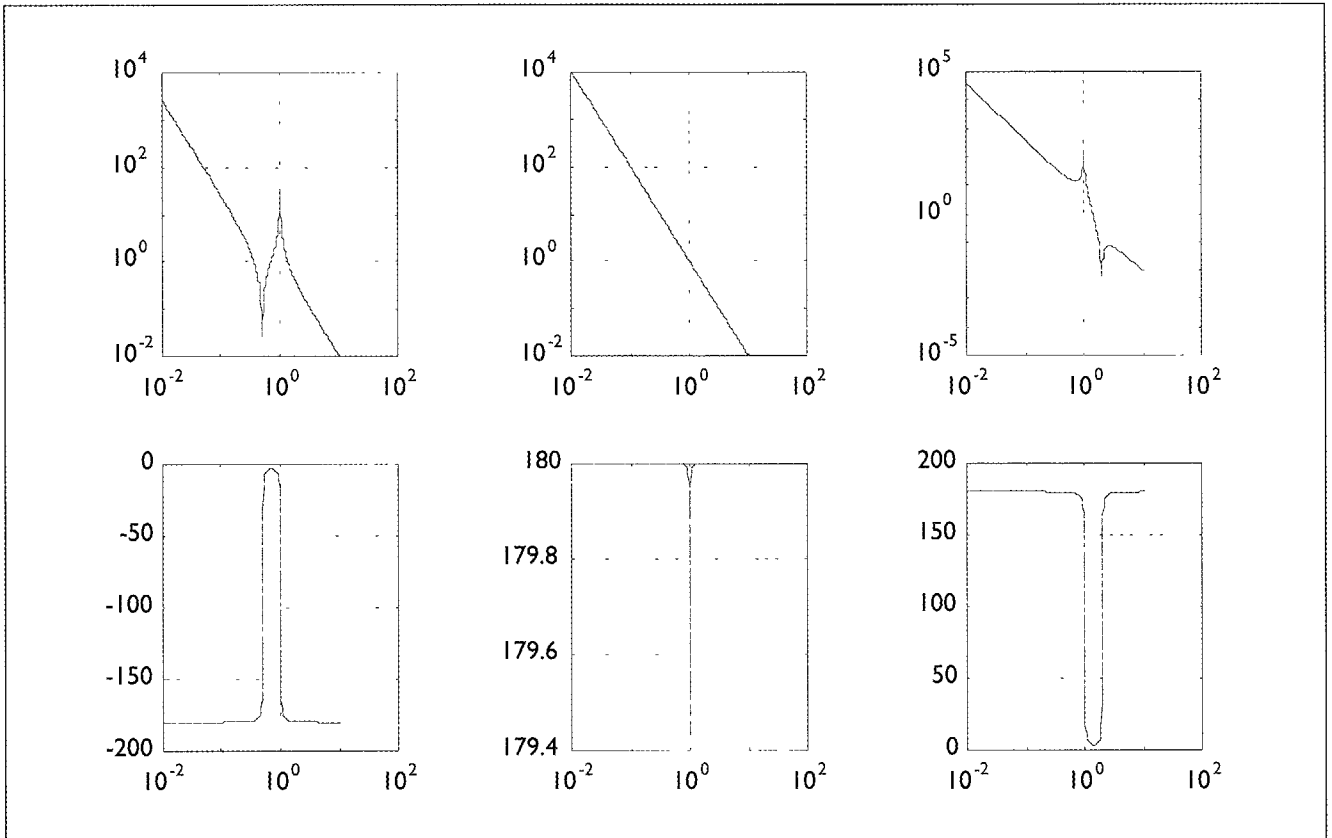
Nogmaals kijkend naar (8) blijkt dat, zolang  $\omega \leq \omega_a$ , de verhouding ( $z/F$ ) negatief is. De verplaatsing is in *tegenfase* met de kracht. Op het ogenblik dat  $\omega \geq \omega_a$  keert de *teller* van teken om en is de verplaatsing met de kracht *in fase*. Het passeren van een nulpunt heeft derhalve het draaien van de fase met +180 graden gevolg, zoals ook het onderste plaatje van afbeelding 9 laat zien.

Als de aandrijffrequentie ( $\omega$ ) gelijk is aan ( $\omega_e$ ), dan is ( $z$ ) onbepaald en kan, ongeacht de grootte van ( $F$ ), elke (grote) waarde aannemen. Dit is resonantie! De noemer van (8) is gelijk aan 0; ( $\omega=\omega_e$ ) noemt men een *pool*.

Nogmaals kijkend naar (8) blijkt dat als  $\omega_a \leq \omega \leq \omega_e$ , de verhouding ( $z/F$ ) positief is. Op het ogenblik dat  $\omega \geq \omega_e$ , keert de *noemer* van teken om en is de verplaatsing met de kracht in *tegenfase*. Het passeren van een resonantiepoint heeft derhalve het draaien van de fase met -180 graden tot gevolg, zoals het onderste plaatje van afbeelding 9 laat zien.

De overdrachtsfunctie (8) wordt nu gebruikt om in het frequentiedomein (frf) te beoordelen hoe de wagen zich zal gedragen. De eerder genoemde eigenschappen stabiliteit en bandbreedte, kunnen met behulp van de frf worden geanalyseerd. Drie typen van frf blijken hier te kunnen optreden.

- 1 De aandrijfkraft ( $F$ ) en de sensor ( $S$ ) bevinden zich beide aan dezelfde zijde van  $Z$  ( $a_f > 0$  en  $a_s > 0$ ). In dit geval (zie (9) en (10)) is  $\omega_a < \omega_e$ . De amplitudeverhouding ( $abs(z/F)$ ) is afgebeeld in het bovenste plaatje van afbeelding 9. De volgorde in deze figuur is: nulpunt < pool. De *bandbreedte* wordt dan bepaald door het nulpunt. De *stabiliteit* van de gesloten lus beoordeelt men mede door naar de fasefiguur, het onderste plaatje in afbeelding 9, te kijken. De fase is  $> -180$  graden als de amplitudeverhouding  $> 1$  is. Dit te regelen systeem levert derhalve geen stabiliteitsprobleem op, tenzij andere componenten in de regellus voor de nodige faseachterstand zorgen.
- 2 De werklijn van de aandrijfkraft ( $F$ ) gaat door het massamiddelpunt ( $Z$ ) of de sensor ( $S$ ) bevindt zich in ( $Z$ ) ( $a_f = 0$  of  $a_s = 0$ ). In dit geval (zie (9) en (10)) is  $\omega_a = \omega_e$ . De amplitudeverhouding ( $abs(z/F)$ ) is afgebeeld in het bovenste plaatje van afbeelding 10. De teller en een deel van de noemer in (8) zijn nu tegen elkaar weggevallen, men kan ook zeggen: de pool en het nulpunt liggen op elkaar. De *bandbreedte* wordt door geen van deze beide beperkt. Het fasegedrag (het onderste plaatje van afbeelding 10), laat zien dat de faseachterstand voortdurend -180 graden is. In combinatie met de amplitudeverhouding levert dit geen *stabiliteitsprobleem* op zolang er maar een klein beetje demping is.
- 3 De aandrijfkraft ( $F$ ) en de sensor ( $S$ ) bevinden zich aan weerszijden van ( $Z$ ) ( $a_f < 0$  en  $a_s > 0$ ) of ( $a_f > 0$  en  $a_s < 0$ ). In dit geval (zie (9) en (10)) is  $\omega_e < \omega_a$ . De amplitudeverhouding ( $abs(z/F)$ ) is afgebeeld in het bovenste plaatje van afbeelding 11. De volgorde in deze figuur is: pool < nulpunt. De *bandbreedte* wordt nu door de pool bepaald. De *stabiliteit* is hier een groot probleem. In het onderste plaatje van afbeelding 11 is namelijk te zien dat de faseachterstand van -180 draait naar -360 graden (0 graden in het plaatje!). Deze situatie moet ten stelligste worden vermeden.



Afbeelding 9. Open lus frf als nulpunt < pool.

Afbeelding 10. Open lus frf als nulpunt = pool.

Afbeelding 11. Open lus frf als pool < nulpunt.

Het fysisch inzicht in de dynamica van de wagen kan nog verder worden verdiept door de volgende beschouwing. De bewegingsvergelijkingen (6) en (7) kunnen worden herschreven als.

$$\frac{\varphi_z}{F}(j\omega) = \frac{a_f}{J_z(-\omega^2 + \omega_e^2)} \quad (11)$$

en

$$\frac{z_z}{F}(j\omega) = -\frac{1}{m\omega^2} \quad (12)$$

Wij vinden dan de kinematische pool (niet te verwarren met de hierboven besproken pool die een wortel van de noemerpolynoom van (8) is). Deze pool (P, afbeelding 12), het punt waarom de wagen kantelt, wordt bepaald door de gecombineerde acties van de, helaas optredende,

rotatie ( $\varphi_z$ ) en de bedoelde translatie ( $z_z$ ). Vanwege de symmetrie (conform afbeelding 6) ligt deze op de y-as; zijn y-coördinaat heeft de waarde

$$y_p = \frac{z_z}{\varphi_z}$$

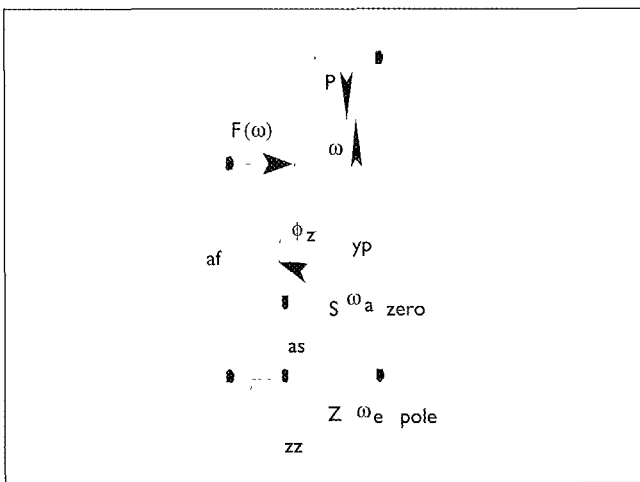
Door te kijken naar (11) en (12) blijkt de y-coördinaat van (P) in afbeelding 12 te liggen op:

$$y_p(\omega) = \frac{-\hat{x}_z(\omega)}{\hat{\phi}_z(\omega)} = \frac{J_z(-\omega^2 + \omega_e^2)}{a_f m \omega^2} \quad (13)$$

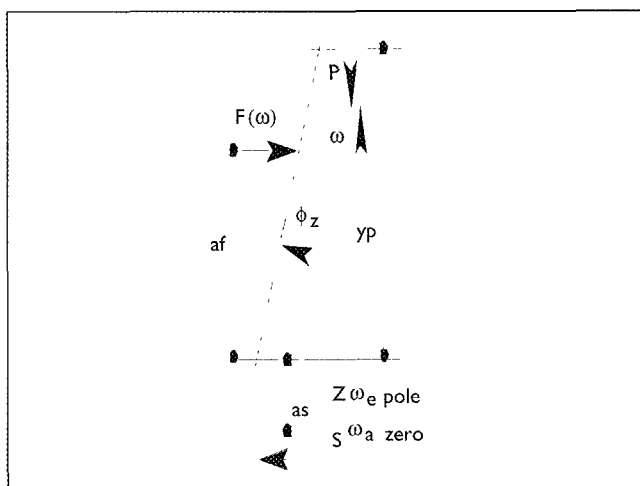
Voor het geval 1) ( $a_f > 0$  and  $a_s > 0$ ) als voorbeeld vinden wij liggingen van de pool, afgebeeld in afbeelding 12, achtereenvolgens:

$\omega \rightarrow 0, y_p \rightarrow \infty$ , pool op oneindig; *lineaire beweging*.  
 $\omega = \omega_a, y_p = a_s$ , pool ter plaatse van de sensor (S), *overdracht nul*, hoewel de wagen beweegt!  
 $\omega = \omega_e, y_p = 0$ , pool ter plaatse van het massa-centrum (Z), *resonantie*

$$\omega \rightarrow \infty, y_p \rightarrow -\frac{J_z}{a_f m}$$



Afbeelding 12. Ligging kinematische pool als nulpunt < pool.



Afbeelding 13. Ligging kinematische pool als pool < nulpunt.

Samenvattend: bij toenemende aandrijffrequentie ( $\omega$ ) komt de pool uit het oneindige en nadert (Z) vanaf de zijde waar zich de kracht bevindt. Hij ontmoet eerst (S);

er treedt een nulpunt op. Vervolgens ontmoet hij (Z); er treedt resonantie op. Afbeelding 12 is derhalve de geometrisch afbeelding van het door afbeelding 9 beschreven gedrag.

Zo behoort afbeelding 13 bij afbeelding 11. Bij zijn komst vanuit het oneindige, aan de zijde van (F), komt (P) eerst langs (Z), resonantie en vervolgens langs (S), overdracht gelijk aan 0.

Ten slotte, bij zeer grote aandrijffrequenties benadert de poolligging de hierboven aangegeven asymptotische waarde

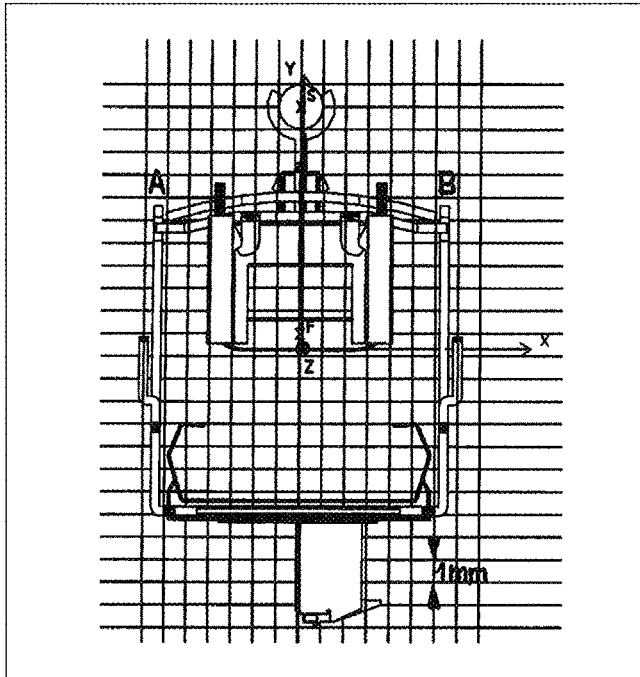
Een conclusie lijkt voor de hand te liggen, namelijk: laten wij kiezen voor de configuratie die behoort bij afbeelding 10. Wij zagen reeds dat daarvoor nodig is:  $a_s=0$  of  $a_f=0$ . Kiezen wij voor  $a_s=0$ , dat wil zeggen (S) in (Z), dan ziet de overdracht eruit als in afbeelding 10, maar dat komt omdat de rotatie niet wordt gemeten, terwijl hij wel optreedt. Het systeem is niet volledig observeerbaar. Alle andere punten van de wagen gedragen zich aanmerkelijk minder fraai. Ook bijvoorbeeld de plaats waar zich de magneetkop bevindt.

Kiezen wij voor  $a_f=0$ , dan is ook afbeelding 10 van toepassing, maar nu omdat de aandrijfkracht (F) door (Z) gaat. De wagen zal zonder enige rotatie worden versneld (de kinematische pool op oneindig). Dit betekent onder andere dat er nu geen punten van de wagen beginnen met achteruitbewegen, zodra er versneld wordt, met andere woorden niet-minimumfasegedrag wordt vermeden.

De plaats van de aandrijfkracht wordt bepaald door de ligging van de koperdraden in het magneetveld van de lineaire motor. Deze plaats is slechts binnen een zekere tolerantie te realiseren. Bij het streven naar het samenvallen van (P) en (Z) zal, bij een symmetrische statistische verdeling, bij de helft van de producten de situatie van afbeelding 11 ontstaan; die van het inherent instabiele systeem. Om dit te vermijden leggen we (P) aan dezelfde zijde als (S), doch zo dicht bij (Z) als mogelijk is, zonder noemenswaardige afkeur te maken. Hoe dicht (P) bij (Z) kan liggen, hangt onder andere af van de mate waarin het wikkelp proces reproduceert. Het resultaat is dat de producten het gedrag van afbeelding 9 vertonen, maar dan zo dat het nulpunt en de pool zeer dicht bij elkaar liggen.

De ligging van (P) ten opzichte van (Z), zoals hier beschreven, moet worden beschouwd zowel ten opzichte van de x-as als ten opzichte van de y-as. De realisatie vindt plaats door op de plaatsen (A) en (B) in afbeelding 14 relatief kleine, ongelijke massa's toe te voegen.

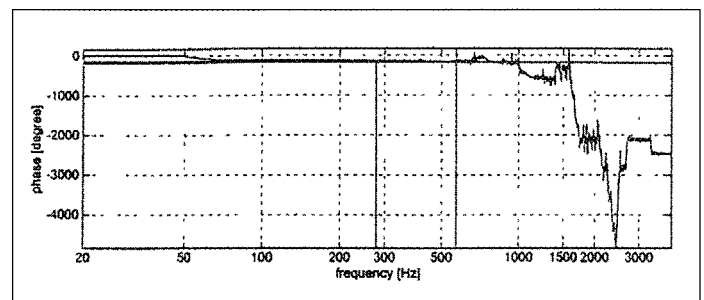
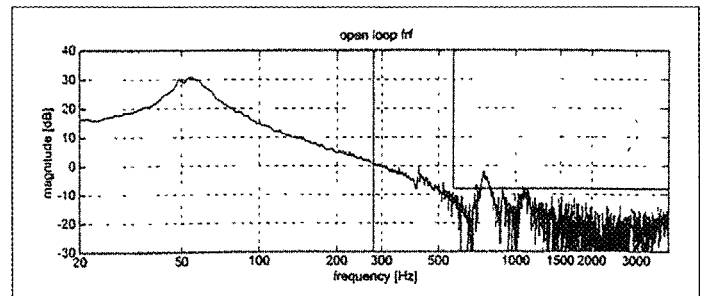




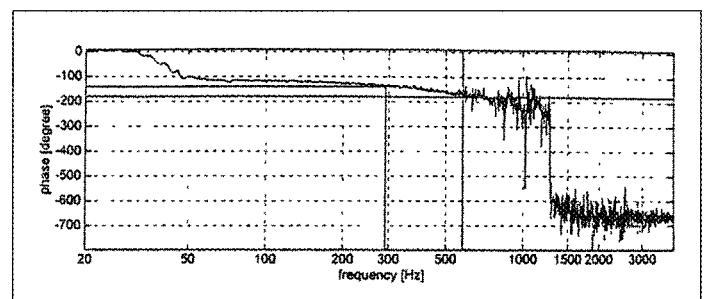
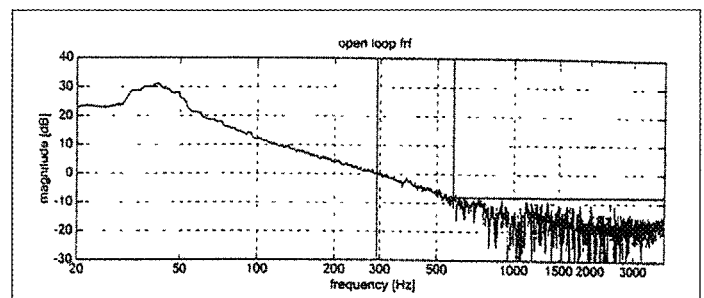
Afbeelding 14. Plaats van (F) en (S) ten opzichte van (Z).

De gemeten frf zonder de correctiemassa's is afgebeeld in afbeelding 15. In de buurt van 400 Hz treedt de eerste (nulpunt<pool-)combinatie op. Niet instabiel, maar de bandbreedte zal de 400Hz niet kunnen overschrijden. Een tweede (nulpunt<pool-)combinatie treedt op bij ongeveer 600 Hz, eveneens niet instabiel; zie het fasegedrag.

Door nu een massa ter plaatse van (A) aan te brengen, verschuift (Z) in de x-richting naar (F) toe en verdwijnt de (nulpunt<pool-)combinatie bij 400 Hz. Aanbrengen van een massa in (B) doet (Z) in de y-richting naar (F) toe verschuiven, waardoor de (nulpunt<pool-)combinatie bij 600 Hz verdwijnt. In (A), respectievelijk (B) worden staalplaatjes van 0,4mm\*6mm\*10mm en 0,4mm\*6mm\*6mm aangebracht. Zo ontstaat de gemeten frf van afbeelding 16. Tot circa 700 Hz komen geen nulpunten of polen meer voor. De wagen is nu geschikt om een bandbreedte van tegen de 700 Hz te halen. Vanaf 1000 Hz mogen uit afbeelding 16 geen conclusies meer worden getrokken. Uit de (niet afgebeelde) coherentiefunctie bleek namelijk dat deze in dit gebied onvoldoende is.



Afbeelding 15. Gemeten frf:  $\text{abs}(z_s/F)$ , en fase, als F en Z niet zeer dicht bij elkaar liggen.



Afbeelding 16. Gemeten frf:  $\text{abs}(z_s/F)$ , en fase, als F en Z zeer dicht bij elkaar liggen.

## Conclusie

De elastosliding is een nieuw concept voor een rechtgeleiding waarbij van speling geen sprake is, waarbij nagnoeg wrijvingsloos rollen optreedt en waarbij de benodigde aandrijfkraft zeer gering en voorspelbaar is. Op deze wijze elimineert men in het ontwerp van het te regelen systeem deze niet-lineaire fenomenen, die door middel van een regellus toch moeilijk kunnen worden bestreden. De stijfheid is beperkt, doch de gevolgen daarvan, in dynamisch opzicht, kunnen worden ondervangen door de aandrijfkraft voldoende dicht langs het massamiddelpunt te laten werken.

De gevoeligheid van de plaats van het massamiddelpunt voor de grootte van de correctiemassa's geeft geen aanleiding tot zeer strenge toleranties in hun afmetingen.

## Literatuur

- [1] THK Co., Ltd., 3-11-6 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan
- [2] Schneeberger GmbH, Gröfenau, Postfach 70, 75339, Höfen/Enz, Germany
- [3] Patent P49917NL00
- [4] K.L.Johnson (1985), *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, ISBN 0521255767
- [6] M.P.Koster, W.T.C.van Luenen, T.J.A.de Vries, Mechatronica, Universiteit Twente, faculteit Electrotechniek

## De auteurs

M.A.M. Grooten, Onstream B.V. E-mail:marcel\_grooten@onstream.com

L.A.M. de Jong, Onstream B.V. Lodewijkstraat 1, 5652 AC, Eindhoven. E-mail: marcel.dejong@onstream.com

M.P. Koster, voorheen. Philips Centre for Industrial Technology en Universiteit Twente. Nu: KEI, Neherlaan 39, 5631NH Eindhoven. E-mail: k.e.i@iae.nl

## ACTUEEL

### Voorlichting over Hoog Vermogen Lasers

Het project 'Kennisoverdracht Hoog Vermogen Lasertechnologie' zal op 5 maart 2002 een voorlichtingsmiddag organiseren met de titel. *Maak het met lasers Lasers en kunststoffen – het onbekende gebied?!* De middag wordt gehouden in 'De Druiventros' in Berkel-Enschot

Het programma van deze middag omvat de volgende presentaties.

Laserapparatuur en toepassing voor kunststoffen wordt gepresenteerd door P. Scheyvaerts en F Bachmann (Rofin-Baasel) en de invloed van materiaaleigenschappen en de keuze van de toepassingen zal worden gebracht door G. Duthmer (DSM). De voor- en nadelen van laserlassen worden behandeld door W. Hovink en G. van

Herwijnen (Philips) en het snijden van kunststoffen voor de automobiellndustrie verklaart J.P Lardot (Robotech-Linpac)

De voorlichtingsmiddag is onderdeel van een uitgebreide voorlichtingscampagne die onder meer naast deze dag ook een algemene voorlichtingsdag 'Maak het met lasers - toepassing van hoogvermogen lasers bij het bewerken van metalen', regionale voorlichting en enkele workshops omvat

Het kennisoverdrachtproject 'Hoog Vermogen Lasertechnologie' is een bundeling van krachten van de volgende organisaties Bond voor Materialenkennis, Metaalunie, Netherlands Institute for Metals Research, Nederlands Instituut voor Lastechniek, Projectbureau voor onderzoek aan

Materialen en Productietechnieken (PMP), Syntens, TNO, Universiteit Twente en de Vereniging FME-CWM

De middag start om 13:30 uur.

De kosten voor deelname bedragen € 125,00 (excl BTW).

Nadere inlichtingen en aanmelding bij de Bond voor Materialenkennis.

Tel: 073 6221833

Fax : 073 6239898

E-mail. bvm@worldonline.nl

Aanmelden ook mogelijk via de website <http://www.nil.nl/voorlichting/laser>.