

Spelingsvrije tandwieloverbrengingen

Citation for published version (APA):

Lathouwers, G. (1990). *Spelingsvrije tandwieloverbrengingen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0964). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1990

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Literatuuronderzoek

Onderwerp: Spelingsvrije tandwieloverbrengingen.

Uitgevoerd door: Gijs Lathouwers

Rapportnummer: 964

Opdracht: Prof.ir.J.M.van Bragt
Begeleider: Ing.J.J.M.Schrauwen

Technische Universiteit Eindhoven,
Faculteit der Werktuigbouwkunde,
Vakgroep Productietechnologie en -Automatisering.

Eindhoven, september 1990.

Voorwoord

Dit literatuuronderzoek is opgezet als onderdeel van de onderzoekopdracht en heeft als onderwerp 'spelingsvrije tandwieloverbrengingen'.

De opzet van deze literatuurstudie is als volgt: eerst wordt het begrip 'speling' beschreven, daarna komen de spelingsvrije tandwieloverbrengingen aan de orde.

Aan het eind wordt een korte samenvatting van de studie gegeven. Dit ten behoeve van het diktaat voor het vak "Bedrijfsmechanisatie Bijzondere Onderwerpen" dat binnen afzienbare tijd beschikbaar moet zijn.

Inleiding

Bij tandwieloverbrengingen kunnen twee verschillende soorten overbrengingsfouten voorkomen. Allereerst kunnen er positiefouten optreden. Positiefouten zijn profielafwijkingen die ervoor zorgen dat de over te brengen beweging niet korrekt doorgegeven wordt.

Daarnaast kan er sprake zijn van speling. Dit is strikt gezien het verlies van beweging bij het omkeren van de draairichting.

Deze twee overbrengingsfouten zijn niet volledig onafhankelijk van elkaar. Toch moeten ze los van elkaar beschouwd worden. Ook al hebben ze invloed op elkaar, ze worden veroorzaakt door verschillende bronnen en bestaan onafhankelijk van elkaar.

Deze literatuurstudie zal beperkt blijven tot speling en methoden om speling op te heffen.

Positiefouten kunnen in het algemeen verkleind worden door nauwkeurige productie. Spelingen kunnen zo ook gereduceerd worden. Dit is in de meeste gevallen echter een (te) dure oplossing. Daarom zijn er verschillende methoden ontwikkeld waarmee spelingen goedkoper geëlimineerd kunnen worden. Deze methoden komen in hoofdstuk 2 aan de orde.

Hoofdstuk 1

Speling

Zoals al uiteengezet is kan speling worden gezien als de hoeveelheid beweging die een tandwiel heeft als het ingrijpende tandwiel stil wordt gehouden. Spling kan gemeten worden in afstand, op de steekcirkel, maar ook als hoekverdraaiing.

Het grootste nadeel van speling is natuurlijk dat de in- en uitgaande beweging van een overbrenging bij heen- en weergaande belasting niet eenduidig bepaald zijn.

Het regelen van een dynamische overbrenging met speling kost dan ook veel moeite, als het al niet onmogelijk is.

Grof gezien ontstaat speling pas als twee tandwielen tegen elkaar worden gemonteerd.

Een groot deel van de speling vindt echter zijn oorsprong in oorzaken die bij de afzonderlijke tandwielen liggen. Het is in feite dus mogelijk een deel van de speling al voor montage te onderscheiden. Bij montage wordt daar dan nog een speling aan toegevoegd.

Deze twee afzonderlijke vormen van speling zullen hier apart besproken worden.

1.1 Speling van een tandwiel

Er zijn drie verschillende soorten speling die gekoppeld zijn aan de afzonderlijke tandwielen, die dus onafhankelijk van de manier van monteren optreden.

Deze verschillende soorten spelingen worden hier systematisch besproken:

1) Variatie in tandgrootte: De grootte van de tanden kan variëren ten gevolge van geplande speling en fabrikagetoleranties.

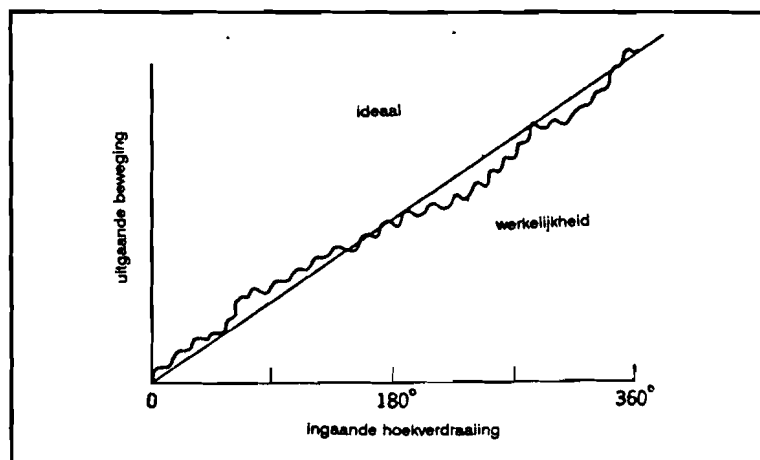
De geplande speling is aangebracht ten behoeve van de montage en demontage. Deze speling is konstant voor alle tanden, dit in tegenstelling tot de fabrikagetoleranties.

Fabrikagetoleranties zijn maatafwijkingen die optreden ten gevolge van de onnauwkeurigheden van het productieproces.

2) Tandfouten: Hieronder vallen tandruimte- en profielafwijkingen. Deze worden veroorzaakt door lokale variaties in het profiel of tandruimte en -dikte.

Ook variaties in de hoek en afwijkingen van de evolvente vallen hieronder.

3) Steekcirkelfouten: Fouten in de concentriciteit en rondheid van de steekcirkel.



Afbeelding 1 Uitgang ten gevolge van tandwielspling vergeleken met ideale uitgang

1.2 Speling die ontstaat door het combineren van tandwielen

Met het tegen elkaar monteren van tandwielen worden nieuwe spelingsbronnen geïntroduceerd. Het monteren brengt, net als de productie van de tandwielen, onnauwkeurigheden met zich mee. Hierdoor kunnen na montage verschillende soorten speling gemeten worden. De afwijking van de tanddikte en de afwijking van de asafstand kunnen onafhankelijk van elkaar gemeten worden.

De speling die ontstaat door de tanddikteverandering is gelijk aan de tanddikteverandering.

Dus $B = \Delta t$.

De speling die ontstaat door verandering in asafstand is:

$$B = 2 \Delta C \tan(\phi)$$

B = speling

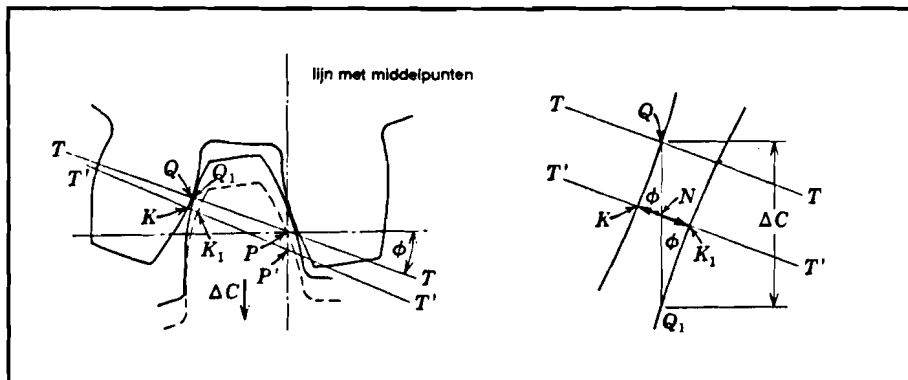
C = centerafstand

t = tanddikte

ϕ = drukhoek tussen twee tanden

T = lijn loodrecht op tand in Q

T' = lijn loodrecht op tand in K, het contactpunt in geval van speling



Afbeelding 2

Bovengenoemde formules voor het berekenen van speling hebben alleen betrekking op loze ruimte. In werkelijkheid dragen doorbuiging, vervormingen, losse asverbindingen, etcetera ook bij tot de speling. De grootte hiervan is moeilijker in formules uit te drukken.

1.3 Bronnen van speling

Voor een goede begripsbepaling zullen de kwantitatieve aspecten van alle spelingsoorzaken hier kort besproken worden. Dit is nuttig omdat speling met een goed basisontwerp voor een groot deel voorkomen kan worden. Daarom is het handig bij het ontwerpen de verschillende spelingsbronnen reeds te kunnen onderscheiden.

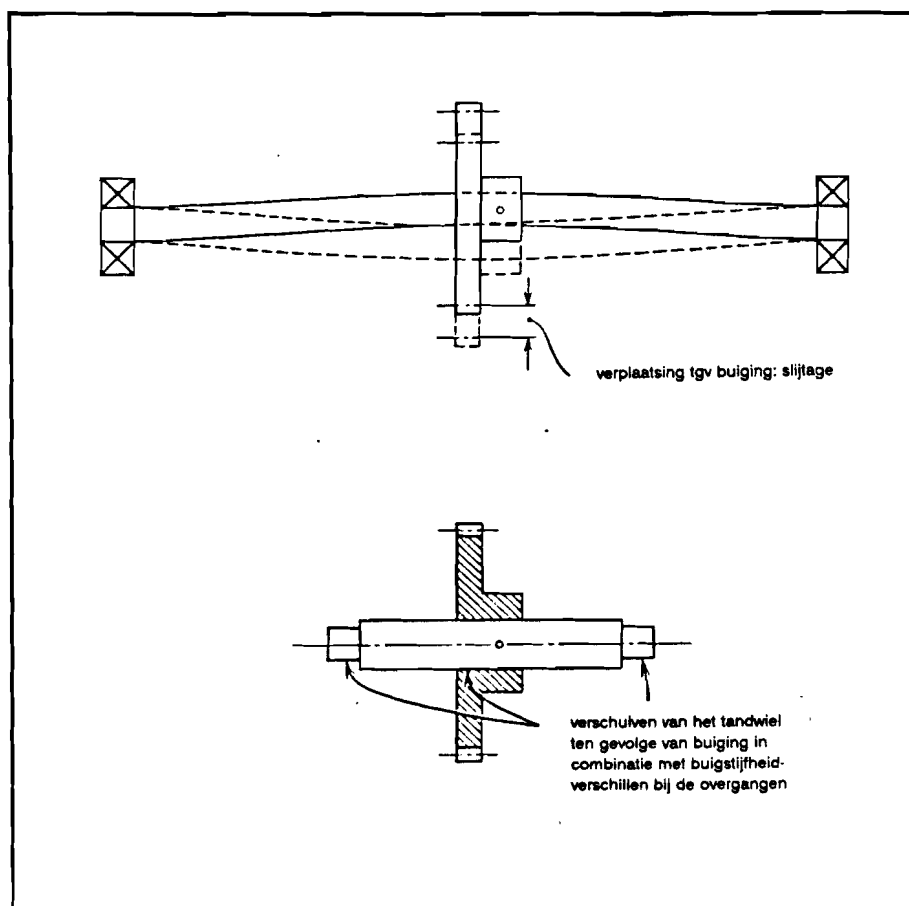
Met het oog op de overzichtelijkheid is de lijst beknopt gehouden. De spelingen zijn in vijf hoofdgroepen verdeeld, die stuk voor stuk besproken worden:

- I) **Reeds bij het ontwerp geplande speling.**
In de meeste gevallen wordt bij het ontwerp enige speling ingepland. Dit ten behoeve van de montage en demontage.
Deze speling kan op verschillende manieren in het ontwerp opgenomen zijn:
 - 1) Geplande speling van het tandwiel. Eén of beide tandwielen worden kleiner gemaakt dan voor ideale Ingrijpig nodig zou zijn.
 - 2) Geplande speling op de middelpunten. De as-afstand van elkaar Ingrijpende tandwielen wordt expres groter gemaakt.
- II) **Speling ten gevolge van produktietolerantie. Primair komt dit neer op:**
 - 1) Tandwielgrootte-tolerantie.
 - 2) Middelpuntsafstand-tolerantie. Dit is een combinatie van de steekcirkeltolerantie en de tolerantie op de afstand van de boringen in het huis, waarin de assen gemonteerd zijn.
- III) **Middelpuntsverschuiving ten gevolge van sekundaire bronnen:**
 - 1) Excentriciteit in de vaste oplettingen:
 - a) Excentriciteit in het buitenloopvlak van kogellagers, waardoor de assen ook excentrisch komen te liggen.
 - b) Spleetbreedte, dus verschil in binnen- en buitendiameters, bij glijlagers.
 - 2) Radiale speelruimte ten gevolge van toleranties en geplande speling:
 - a) Radiale speling in kogellagers.
 - b) Passing tussen lager en lagerhuis.
 - k) Passing tussen tandwielas en lager.
 - 3) Fouten in de componenten:
 - a) Speelruimte tussen component-geleider en huisboring.
 - b) Excentriciteit in de component-geleider.
 - k) Afwijking in de vlakheid en haaksheid van de componenten.
 - d) Radiale speling op de componenten-as.Dit alles ten gevolge van een fout in de componenten.
- IV) **Oorzaken van speling die variabel zijn met tandwielrotatie. Hierbij veroorzaakt excentriciteit of tandfouten voor een sinusvormige vergroting en verkleining van de speling. Excentriciteit verandert de speling met de frequentie van de rotatie, tandfouten hebben natuurlijk voor een veel hogere frequentie. Bronnen:**
 - 1) Speling veroorzaakt door het tegen elkaar monteren van tandwielen:
 - a) Slijtage
 - b) De combinatie van tandfouten bij elkaar Ingrijpende tandwielen
 - k) Dwarsslijtage, wat zowel bij rechte als schuine vertanding speling kan veroorzaken
 - 2) Speelruimte tussen tandwielboring en schacht.

3) Slijtage van het tandwiel ten gevolge van buiging. Buiging heeft directe verplaatsing ten gevolge (zie ook onder V).

Veelvuldige buiging heeft slijtage tot gevolg, waardoor speling ontstaat.

Daarbij kan veelvuldige buiging ook verschuiving van het tandwiel op de as ten gevolge hebben. Hier ontstaat speling, zowel ten gevolge van de speling als van de verschuiving.



Afbeelding 3 Verplaatsing tgv buiging

4) Excentriciteit in de kogellager.

5) Indirekte slijtage:

a) As-komponenten.

b) Tandwielcomponenten.

V) Overige bronnen:

1) Thermische vervormingen.

2) Doorbuiging ten gevolge van mechanische belasting, waardoor direct speling ontstaat.

3) Omgevingsinvloeden. Speciaal trillingen, schokken en acceleraties bevorderen speling.

Alle bovenstaande spelingsbronnen kunnen ontleed worden tot een konstante en een variabele factor, waarbij het variabele deel factoren heeft met zowel omwentelingsfrequentie als "tandfrequentie". De konstante factor blijft gedurende een omwenteling dezelfde grootte behouden.

Naast deze speling bestaan ook zogenaamde transmissiefouten. Deze bestaan net als de variabele spelingsfactor uit delen met omwentelings- en tandfrequentie.

Handwritten note: nauwkeurigheid

In de praktijk zal er in principe altijd speling zijn ten gevolge van toleranties, montage-onnauwkeurigheden, slijtage, etcetera. Dit ongeacht de nauwkeurigheid waarmee de onderdelen geproduceerd worden.

Om ook in het geval dat speling absoluut uit den boze is een tandwieloverbrenging toe te kunnen passen zijn er verschillende konstrukties bedacht waarmee eventuele speling opgeheven wordt. Deze komen in hoofdstuk 2 aan bod.

Hoofdstuk 2

Spelingsvrije tandwieloverbrengingen.

Nu het begrip "speling" aan bod is gekomen, kan gekeken worden naar methoden waarmee dit geëlimineerd kan worden.

In het komende deel zullen de principes, met voor- en nadelen, waarop spelingsvrije tandwieloverbrengingen stoelen, behandeld worden. Bovendien zullen konstruktieve uitvoeringen beschreven worden.

Overigens zullen niet alleen spelingsvrije overbrengingen aan de orde komen. Ook konstrukties waarbij alleen de konstante faktor van de speling geëlimineerd wordt zijn in deze studie opgenomen.

2.1 Methoden van spelingverkleining en -eliminatie.

Zoals in het eerste hoofdstuk al werd vermeld wordt speling voor een groot deel geëlimineerd als precisietandwielen toegepast worden. Het nauwkeurig produceren van de componenten loopt echter snel in de papieren.

In de loop der tijd zijn er verschillende konstrukties bedacht waarmee speling^{37f} op andere wijzen adequaat gekompenseerd kunnen worden. Het is vaak aantrekkelijker een van deze goedkopere methodes, die hieronder beschreven worden, te kiezen.

Niet alleen vanwege de kostenbesparing, meestal voldoen ze ook beter.

Zoals reeds geschreven volgt hier een beschrijving.

2.1.1 Verstelbare middelpunten.

Dit is een methode waarbij alleen het konstante deel van de speling opgeheven wordt, zij is dus niet geheel spelingsvrij. De bruikbaarheid hangt sterk van het ontwerp af. Minstens één as moet verschuifbaar zijn. het probleem hierbij is dat de assen parallel moeten blijven met elkaar wanneer ze verschoven worden. Als dat niet gebeurt worden de tanden verkeerd belast, wat nadelig is voor de levensduur.

In de praktijk wordt meestal het hele asdragende onderdeel verschuifbaar gemaakt loodrecht op de as.

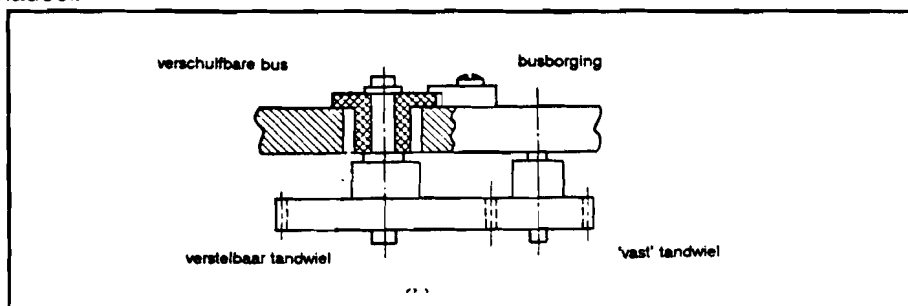
Verstelbare assen worden vaak toegepast bij tandwieloverbrengingen die uit meerdere tandwielen bestaan en waarvan alleen de laatste overbrenging spelingsarm gemaakt moet worden. Dit zijn meestal reductiekasten, omdat daarbij de laatste overbrenging de meeste invloed heeft op de speling.

Deze methode wordt verder vooral gebruikt voor overbrengingen met wormwielen en kruiskoppelingen met kegelvormige wielen, omdat dit voor deze overbrengingen de enige toepasbare methode is.

Deze methode heeft natuurlijk ook nadelen. Het aantal onderdelen stijgt bij het toepassen van deze methode. Dit kan een nadelige invloed hebben op de levensduur. Daarbij moet de konstruktie vakkundig in elkaar gezet worden. Als de assen bijvoorbeeld een klein stukje uit het lood staan kunnen binnen korte tijd problemen verwacht worden. De betrouwbaarheid hangt dus voor een groot deel van de monteur af.

Verder is een goed afgestelde overbrenging gevoelig voor ontregeling, zodat zij regelmatige controle vereist.

Bovendien is het eerder al aangestipte feit dat deze methode alleen de konstante faktor van de speling opheft een nadeel.



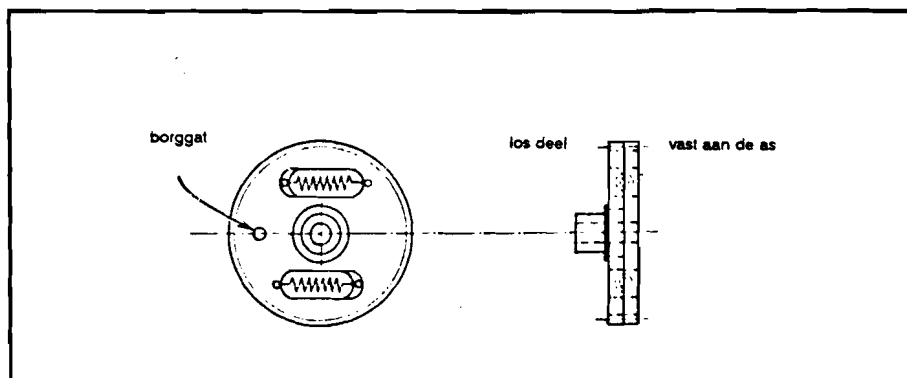
Afbeelding 4 Tandwielpaar met verstelbare middelpunten

2.1.2 Met veer voorgespannen, gedeeld tandwiel.

Dit is een erg betrouwbare en vaak toegepaste manier om speling te vermijden.

De speling wordt opgeheven doordat de tanddikte van de ingrijpende tanden ieder moment op de ideale waarde wordt gehouden.

De meest toegepaste manier is die van afbeelding 5. Soms worden ook andere elementen gebruikt om de konstruktie onder spanning te zetten. Zo kunnen ook torsleveren en elastische kunstofelementen toegepast worden.



Afbeelding 5 Gedeeld, voorgespannen tandwiel

De voordelen van voorgespannen, gedeelde tandwielen zijn beknopt weergegeven:

- 1) De produktietoleranties en andere beïnvloedbare spelingsoorzaken (zie hoofdstuk 1) kunnen ruim gekozen worden.
- 2) Het assembleren is redelijk eenvoudig. Voor montage worden de twee delen van het tandwiel met een pen geborgd, zodat ze niet verschoven zijn ten opzichte van elkaar. Montage is dan eenvoudiger dan bij normale tandwielen. Wanneer de pen verwijderd wordt, is het tandwiel meteen goed geïnstalleerd.
Zeker vergeleken met de methode met de verschuifbare assen is dit een niet te onderschatten voordeel.
- 3) Alle verschillende spelingsoorzaken worden gekompenseerd.
- 4) Ook speling ten gevolge uitzetten en inkrimpen en andere spelingsoorzaken die tijdens bedrijf ontstaan worden automatisch gecorrigeerd.

Er kleven ook nadelen aan deze spelingsonderdrukking:

- 1) De kracht van de veer moet groter zijn als de maximaal door te leiden kracht. Hierdoor wordt de toepasbaarheid van deze methode beperkt tot konstrukties waarbij relatief kleine krachten doorgeleid moeten worden.
- 2) Het feit dat de veerkracht gelijk is aan de maximaal over te brengen kracht zorgt ervoor dat de piekbelasting optreedt als de overbrenging onbelast is. De onderdelen van de overbrenging staan daardoor konstant onder belasting. Dit veroorzaakt spanningen en vervormingen, wat een negatieve invloed heeft op de levensduur.
- 3) Als de tandwielen niet goed gemonteerd zijn kunnen er binnen korte tijd problemen verwacht worden. Normale tandwielen blijven ook als ze niet optimaal geplaatst zijn een tijd functioneren. De voorgespannen, gedeelde tandwielen daarentegen, hebben een erg beperkte levensduur, als ze niet perfect geplaatst zijn.
- 4) Het geheel moet zwaarder uitgevoerd worden. De konstruktie staat niet alleen konstant onder spanning (zie punt 1), maar bovendien heeft het dubbele tandwiel een breder tegenoverliggend tandwiel nodig. Dit kost meer materiaal, ruimte en massa. Vooral bij kleine overbrengingen is dit van belang, omdat de faktor ruimte dan extra zwaar doorweegt.
- 5) De kwaliteit van de overbrenging is sterk afhankelijk van de nauwkeurigheid van de tandoppervlakten. Dit is met name sterk merkbaar als de tandwielen niet veel tanden hebben, omdat de tandoppervlaktes dan relatief groot zijn.

Met name vanwege het eerste en het vierde nadeel kunnen deze overbrengingen alleen voor relatief lichte belasting gebruikt worden.

Dit gekombineerd met het feit dat de overbrenging volledig spelingsvrij is, maakt deze methode uitermate geschikt voor kleine regelsystemen.

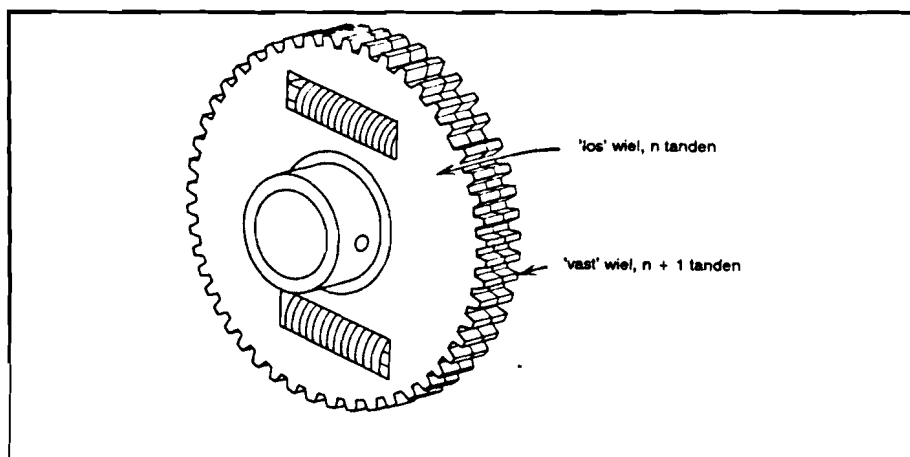
2.1.3 Variaties met voorgespannen, gedeelde tandwielen

In de loop der tijd zijn er op bovenstaande methode voor specifieke toepassingen verschillende variaties bedacht.

2.1.3.1 Gedeelde tandwielen met variabele voorspanning

In sommige gevallen kan een variabele veerkracht toegepast worden.

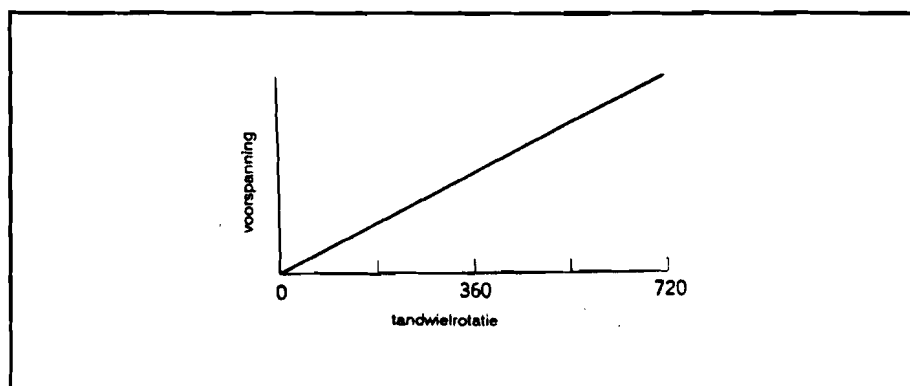
Dit kan worden gedaan door 'vaste' en het 'losse' wiel verschillende aantallen tanden te geven. Per omwenteling wordt de voorspanning dan groter.



Afbeelding 6 'Vast' en 'los' wiel met verschillend aantal tanden

Dit is een speciale toepassing voor gevallen waarbij naar twee kanten toe belasting is en telkens maar een bepaald aantal omwentelingen iedere kant op wordt gedraait. Bovendien moet de belasting per omwenteling groter worden.

Het mag natuurlijk geen bezwaar zijn dat er geen voorspanning is in de middenstand.



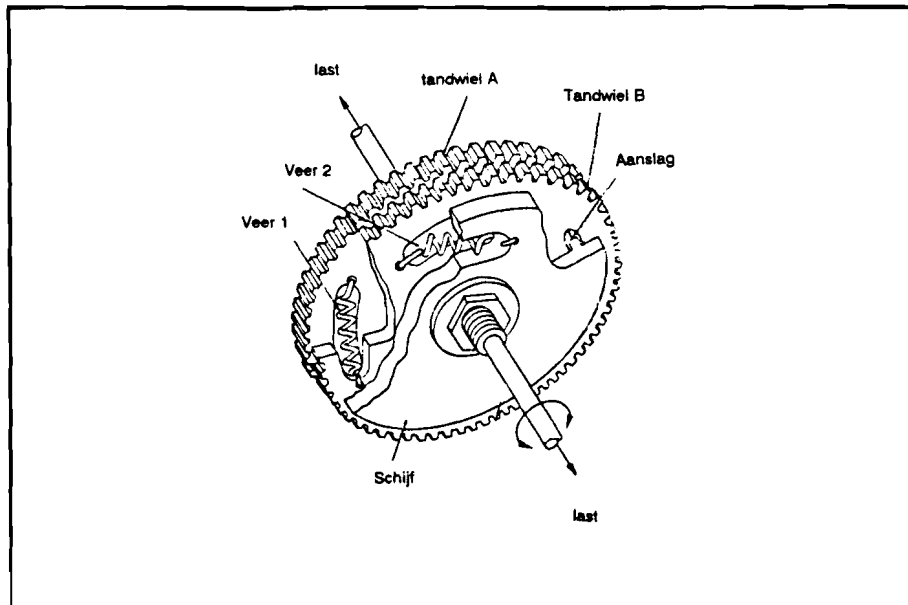
Afbeelding 7 Voorspanning als gevolg van de hoekverdraaling

Het voordeel van deze methode is dat er bij de specifieke gevallen dat zij toegepast wordt, er geen voorspanning is als die ook niet nodig is.

De grootste nadelen liggen bij de feiten dat er maar een beperkt aantal omwentelingen mogelijk zijn en dat deze konstruktie energie absorbeert.

2.1.3.2 Dubbel voorgespannen constructie

Bij de constructie van figuur 8 is een dubbele voorgespanning toegepast. Hierbij wordt de ingaande beweging niet alleen spelingsvrij doorgegeven, eventuele schokken in de ingaande beweging worden bovendien omgezet in een vloeiende beweging.

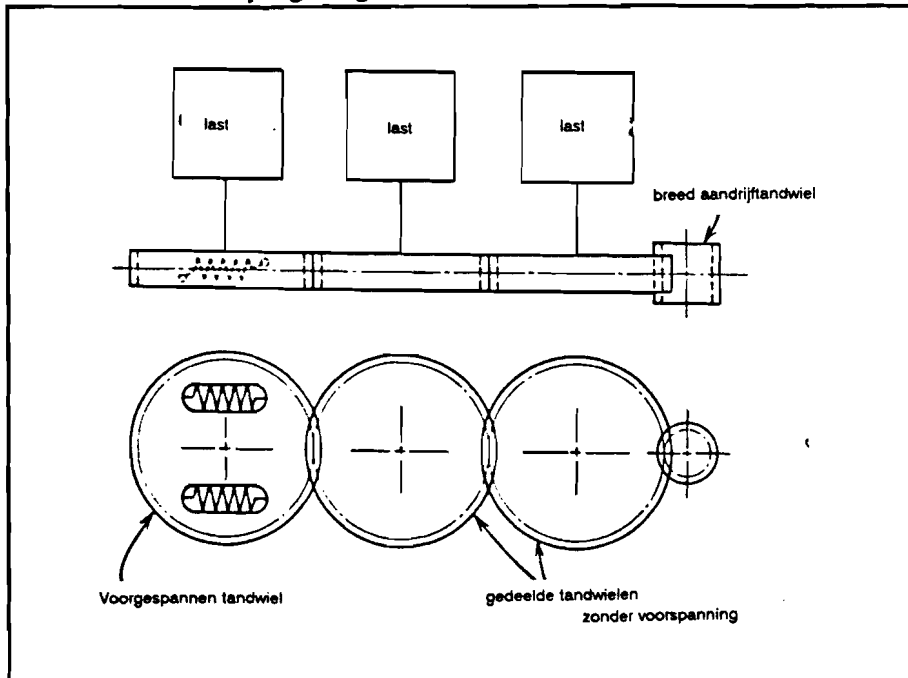


Afbeelding 8 Dubbel voorgespannen constructie

De schijf zit vast op de uitgaande as gemonteerd. De tandwielen kunnen los om de as draaien. Tandwiel A zit met een veer aan de schijf vast, tandwiel B zit met een veer aan A vast. De twee tandwielen worden aangedreven door een tegenoverliggende vertanding. De veer tussen A en B zorgt ervoor dat deze overbrenging spelingsvrij is. Door de veer tussen B en de schijf worden pulserende ingaande bewegingen in vloeiende bewegingen omgezet.

2.1.3.3 Serie van voorgespannen gedeelde tandwielen.

Deze konstruktie wordt toegepast als één overbrenging meerdere uitgaande assen heeft, dus als meerdere assen door één aandrijving aangedreven worden.



Afbeelding 9 Serie van voorgespannen gedeelde tandwielen

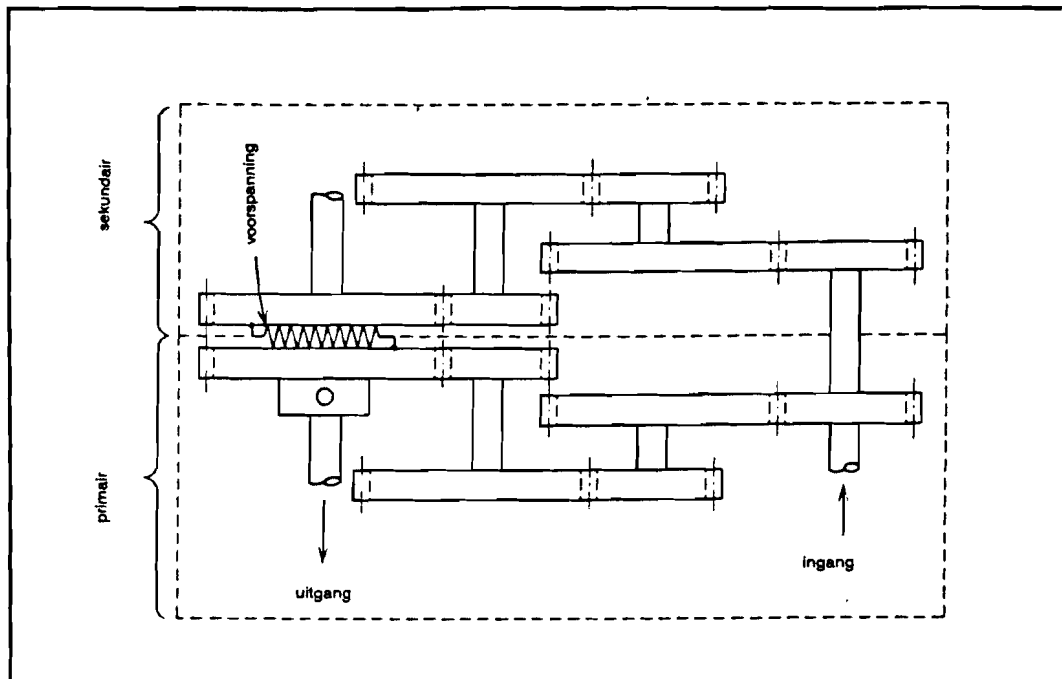
Bij voorbeeld 9, waar drie assen aangedreven worden, heeft één as een tandwiel met veer-voorspanning. De andere twee assen, die aangedreven moeten worden bestaan uit een vast en een los tandwiel zonder veren. Het ene gesplitste tandwiel met veren houdt dus het gehele tandwielstelsel onder spanning. Net als bij de vorige voorgespannen oplossingen moeten de veren dus zwaarder zijn als de maximale belasting (nu dus van alle tandwielen) bij elkaar.

De tandwielen moeten axiaal natuurlijk wel zo nauwkeurig geplaatst zijn dat ieder tandwiel alleen met het rechtstreeks tegenoverliggende tandwiel in contact komt. Dit wordt soms bereikt door tussen de tandwielen enige ruimte open te houden op de assen. Hiermee gaat wel het voordeel, dat er redelijk standaard onderdelen gebruikt kunnen worden, verloren.

De tussenliggende tandwielen zijn vaak standaard gedeelde tandwielen waar de veren uit verwijderd zijn.

2.1.3.4

Spelingsonderdrukking met sekundair voorgespannen tandwielstelsel.

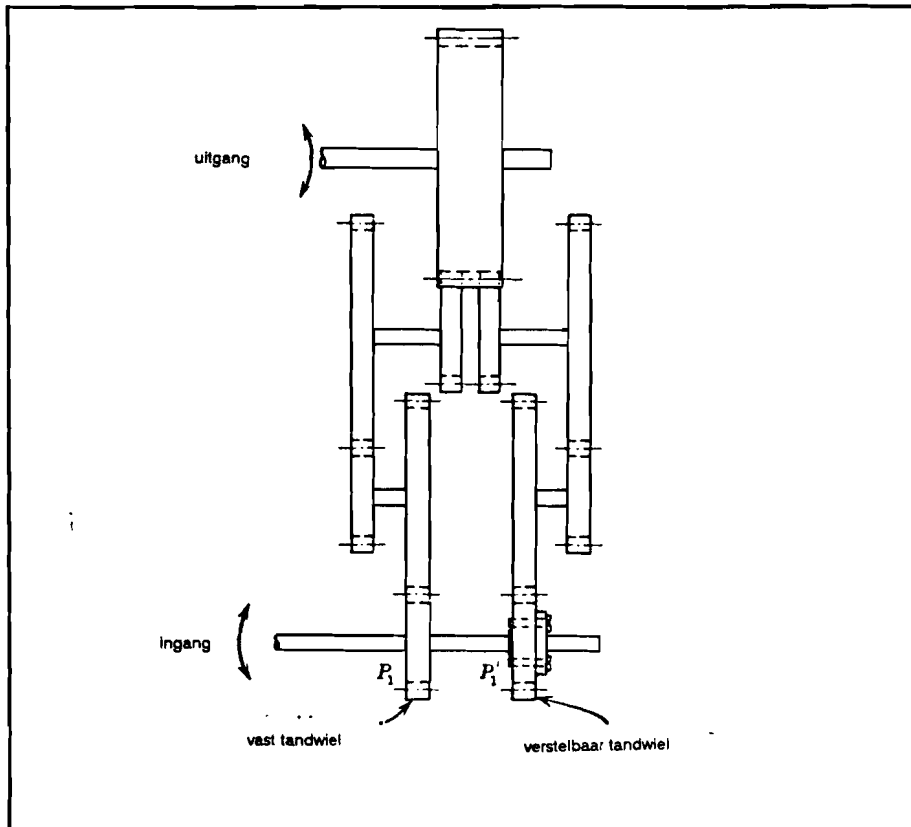


Afbeelding 10 Sekundair voorgespannen tandwielstelsel

In principe is dit dezelfde methode als hierboven werd beschreven. Een voordeel is echter dat alle tandwielen niet twee aan twee hetzelfde hoeven te zijn. Alleen de uiteindelijke overbrengingen van beide tandwielstelsels moeten gelijk zijn. Hierdoor kan compakter gebouwd worden. Bovendien hoeft het sekundaire stelsel lang niet zo nauwkeurig gefabriceerd te worden als het primaire. Het zorgt alleen voor de voorspanning. Eventuele onnauwkeurigheden worden door de veren opgevangen. Nadeel is natuurlijk dat er weer meer onderdelen nodig zijn. Deze methode wordt voornamelijk gebruikt voor langzaam draalende overbrengingen.

2.1.3.5 Veerloze variatie

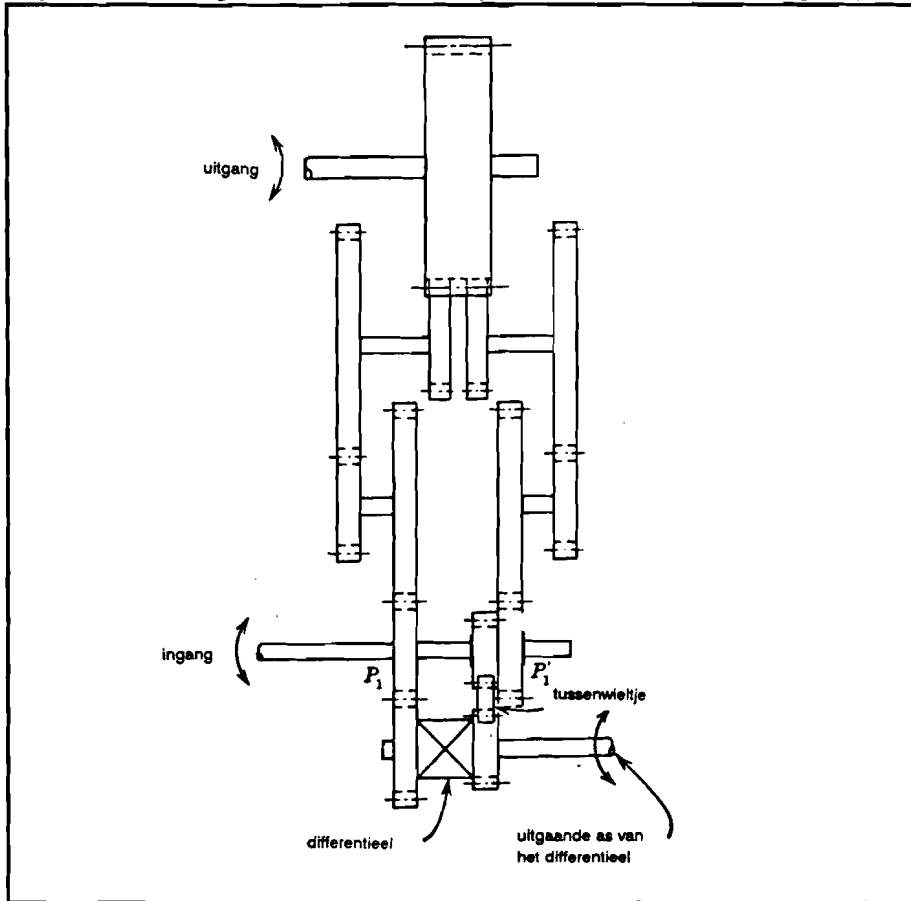
Bij de variatie van afbeelding 11 is het tandwiel op de uitgaande as breed uitgevoerd. De spanning wordt op de ingaande as opgebouwd. Niet door een veer, maar door de tandwielen P_1 en P_1' ten opzichte van elkaar te verdraaien en dan vast te zetten. Hierdoor komt de hele overbrenging onder spanning te staan.



Afbeelding 11 Veerloos voorgespannen

Deze constructie heeft als voordeel dat alle tandwielen bijdragen tot de vermogensoverdracht. Hierdoor moeten beide 'overbrengingshelften' natuurlijk wel even nauwkeurig gefabriceerd worden.

Het onder spanning zetten van de tandwielen P_1' kan vergemakkelijkt worden door een differentieel te plaatsen tussen P_1 en P_1' . De uitgaande as van het differentieel blijft stilstaan als alle andere assen draaien. De voorspanning kan dus tijdens bedrijf bijgesteld worden door deze as te verdraaien. Bij de uitvoering van afbeelding 12 is een tussenwiel tje nodig om de draairichting kloppend te houden.



Afbeelding 12 Voorspannen met differentieel

2.2 Gefixeerde gedeelde tandwielen

Deze oplossing voor hoogbelaste overbrengingen bestaat uit gedeelde tandwielen zonder voorspanveer. De tandwielhelften worden afgesteld en ten opzichte van elkaar gefixeerd. Ze moeten dus wel op hun smalste punt afgesteld worden anders treedt bij dit smalste punt toch steeds speling op. Het grootste voordeel is het ontbreken van veren, met het nadeel dat de over te brengen last aan een maximum gebonden is.

De methode heeft echter ook nadelen:

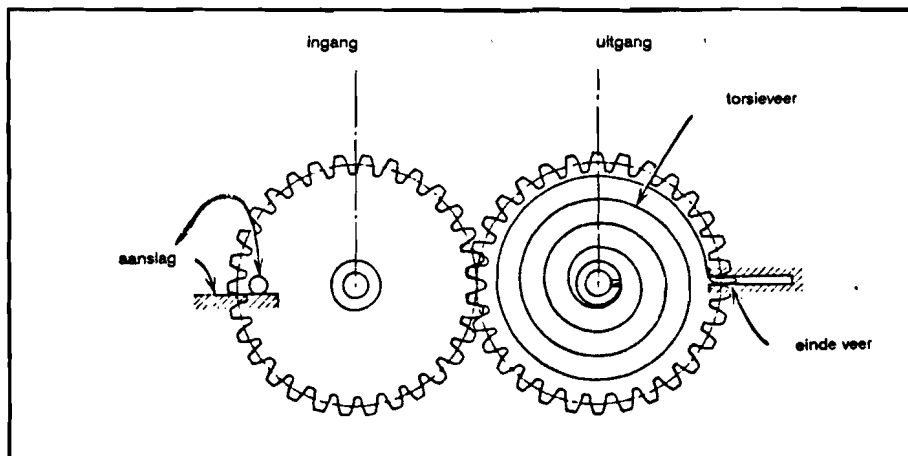
- 1) Alleen de konstante faktor van de speling wordt opgeheven.
- 2) Het goed afstellen vergt vakmanschap.
- 3) De tandwielen zijn moeilijk uitwisselbaar, zeker als de twee helften irreversibel aan elkaar gekoppeld zijn.

2.3 Voorspanning aan vaste wereld

Bij tandwielparen die een eindig aantal keren rondgaan is het mogelijk de overbrenging direkt onder spanning te zetten, dus zonder gedeelde tandwielen. Meestal wordt dit gedaan met behulp van een aan de vaste wereld gefixeerde torsieveer.

Ook voor deze konstruktie geldt dat de veerkracht groter moet zijn dan de zwaarste belasting. Hierdoor blijft ook deze mogelijkheid meestal voorbehouden aan lichte belastingen.

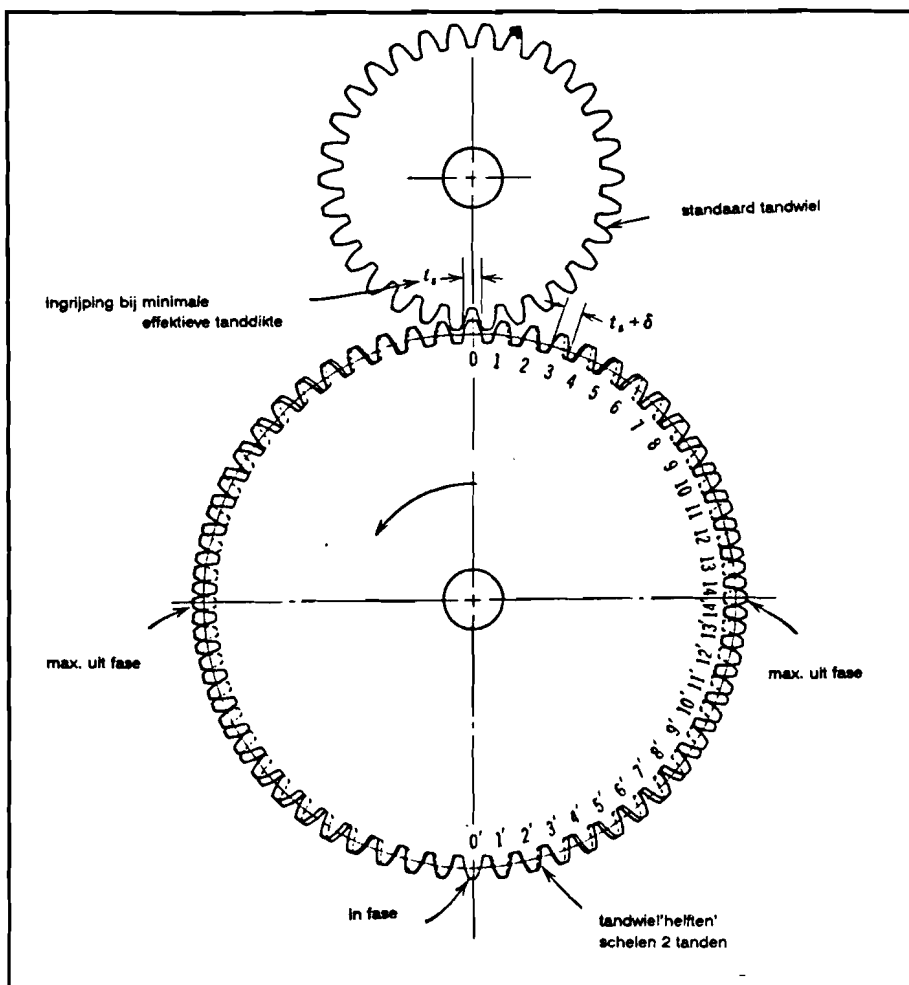
Aangezien het aantal omwentelingen gelimiteerd is wordt er vaak een aanslag gemonteerd.



Afbeelding 13 Voorspanning aan vaste wereld

2.4 Overbrengingen met verstelbare tanddikte

De verstelbaarheid van de tanddikte zit hier in het feit dat twee tandwielen, waarvan het aantal tanden twee of meer verschillen los naast elkaar gemonteerd worden en ingrijpen bij hetzelfde tandwiel.



Afbeelding 14

De tanden van de twee tandwielen zijn dus telkens een stukje uit fase, alleen op de punten $360/\delta N$ zijn ze steeds in fase.

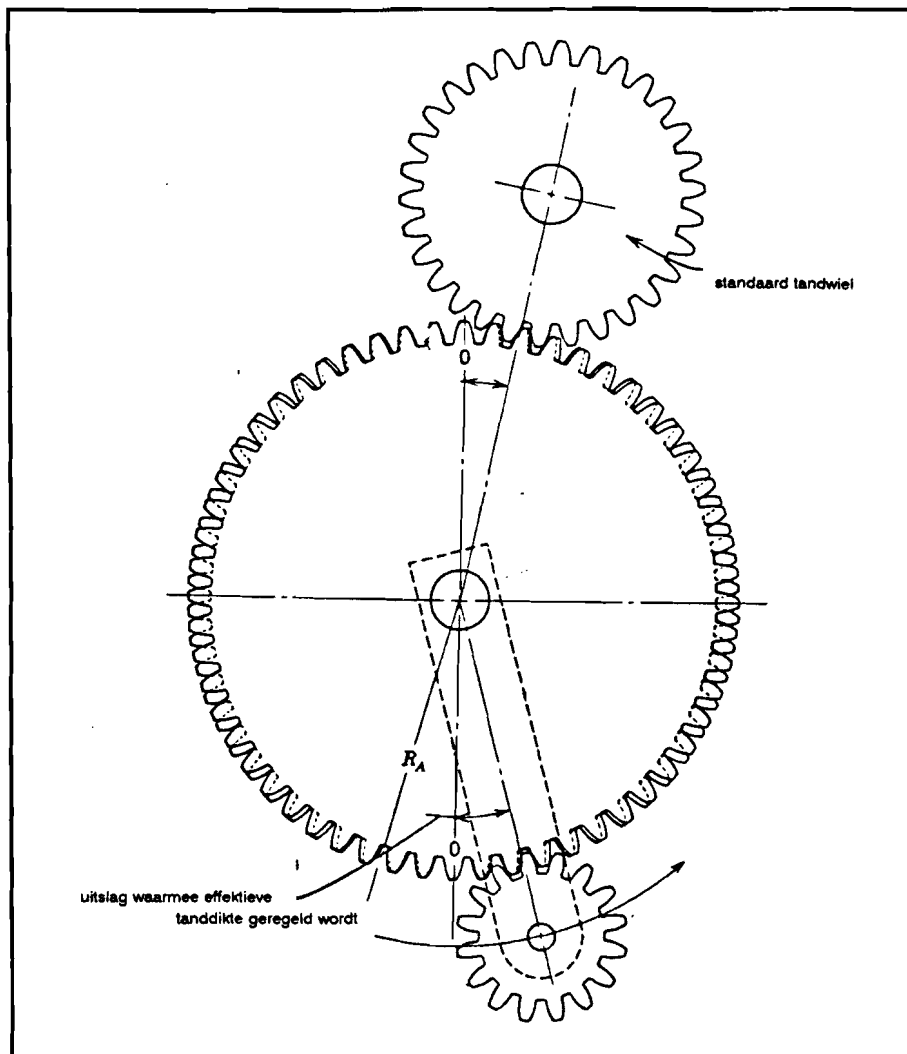
De effectieve tanddikte van twee tanden samen is: $t_e = t_s + \delta$

$$\delta = 2n_i \cdot \delta N t_s / N$$

- t_e : effectieve tanddikte
- t_s : tanddikte van enkele tand
- δ : toegevoegde tanddikte
- N : aantal tanden van het tandwiel met de minste tanden
- δN : verschil in het aantal tanden tussen de twee tandwielen
- n_i : tandnummer gerekend vanaf het dichtsbijgelegen tandpaar dat in fase is

Er is dus een geleidelijk verloop in de effectieve tanddikte van tand tot tand. Hier wordt handig gebruik van gemaakt bij het spelingsvrij maken van de overbrenging.

Door een klein tandwielletje aan het tandwielstelsel toe te voegen kan de tanddikte op iedere plaats geregeld worden.



Afbeelding 15 Tandwieloverbrenging met verstelbare effectieve tanddikte

Wanneer het kleine tandwielje verschoven wordt langs de grote tandwielen verschuift ook het punt waar de tanden van de naast elkaar liggende tandwielen perfect naast elkaar liggen.

Op deze manier kan dus de tanddikte bij het ingrijpingspunt met het aanliggende tandwiel gevarieerd worden tot de speling verdwenen is.

Konstruktief kan dit het handigst gedaan worden op de manier van de afbeelding, namelijk door een klein tandwiel op een arm te zetten die zijn middelpunt hetzelfde heeft als de twee grote tandwielen. De speling kan nu verkleind of vergroot worden door het kleine tandwiel te verplaatsen.

Deze methode heeft specifieke voordelen:

- 1) Het afstellen is eenvoudig. Beweging van de regelarm heeft een kleine verandering van de speling tot gevolg. Hierdoor is het eenvoudig kleine veranderingen van de speling te bewerkstelligen.
- 2) Met deze overbrenging kunnen ook grote momentbelastingen doorgegeven worden.
- 3) De levensduur van de tandwielen is vrij groot omdat de tanden alleen door de daadwerkelijke belasting belast worden. Dit in tegenstelling tot de met veren voorgespannen constructies die in onbelaste toestand juist de grootste tandspanning hebben.
- 4) De speling kan ook bijgeregeld worden terwijl de tandwielen draaien.

Er zijn echter ook weer nadelen:

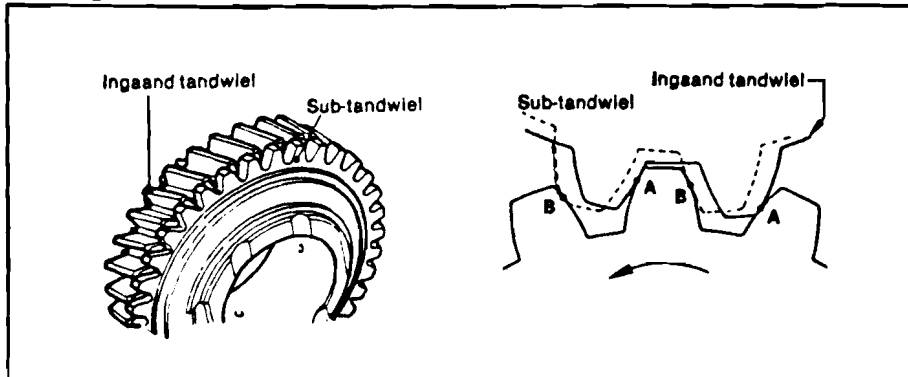
- 1) De variabele speling wordt niet geëlimineerd, de speling wordt bij de smalste ingrijping afgesteld. Bij wijdere ingrijpingen treedt dan toch nog een beetje speling op.
- 2) Het kleine tandwiel is weer een extra tandwiel dat bestand moet zijn tegen de maximale belasting.
- 3) Er is een continue rotatie tussen de twee grote tandwielen. Dit vergt konstruktieve maatregelen.

Ondanks deze nadelen is deze methode speciaal geschikt voor zware belastingen.

Deze oplossing is ook erg geschikt voor konstrukties die vaak gemonteerd en gedemonteerd worden. Het afregelen van de speling is dan eenvoudig.

2.5 Axiaal voorgespannen tandwielpaar met verschillend aantal tanden

Een andere oplossing met twee tegen elkaar gemonteerde tandwielen met verschillend aantal tanden is die van afbeelding 16.



Afbeelding 16 Axiaal voorgespannen tandwielpaar met verschillend aantal tanden

Hierbij zijn twee tandwielen met dezelfde steekcirkel, maar met verschillend aantal tanden tegen elkaar gemonteerd. Ze zijn niet met een veer aan elkaar verbonden, maar worden met een veer tegen elkaar gedrukt. Hierdoor kunnen ze met verschillende toerentallen draaien. De onderlinge wrijving zorgt ervoor dat de effectieve tanddikte optimaal blijft.

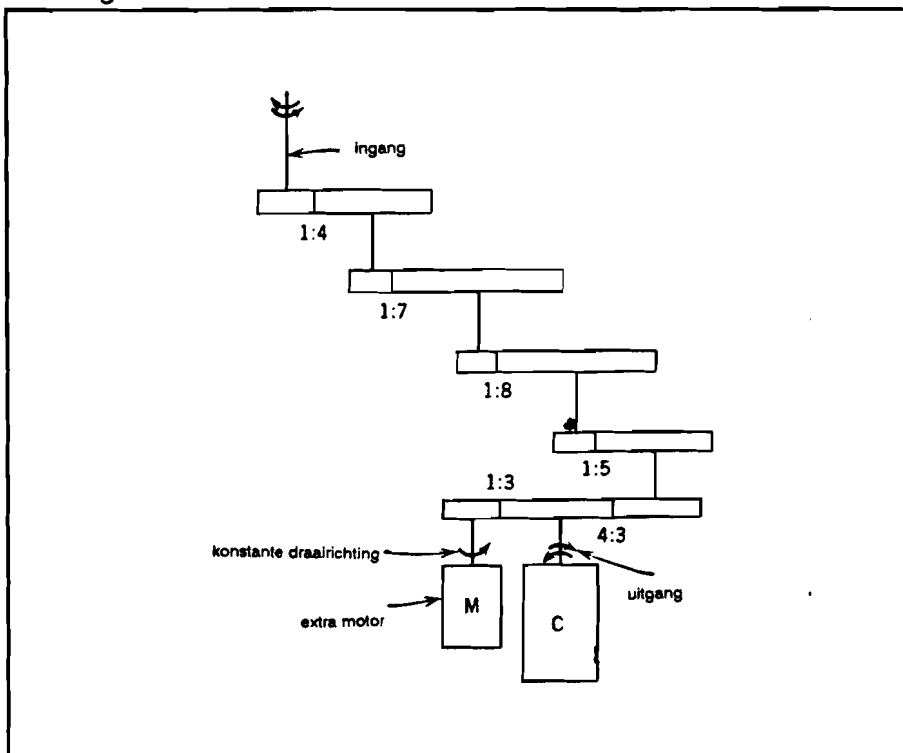
Het grote voordeel van deze constructie is dat zij robuust uit te voeren is, waarbij geen veren de maximale belasting moeten overschrijden. Hierdoor is zij geschikt voor grote belastingen.

Een nadeel is wel dat de langs elkaar draaiende tandwielen aan wrijving en slijtage onderhevig zijn.

2.6 Spelingsvereffening met hulpmotor

Bij deze methode wordt er een motor in de overbrenging opgenomen die konstant een koppel levert dat de speling opheft.

Deze methode is alleen geschikt voor reducerende overbrengingen, bij andere bestaat de kans dat de motor de assen teruguit laat draaien.



Afbeelding 17 Voorbeeld van extra motor voor de spelingsonderdrukking

Bij deze reducerende overbrengingen wordt de motor die de speling op moet heffen bij de laatste stappen aangebracht. De weerstand die dan ondervindt is groot genoeg om te voorkomen dat de assen de verkeerde richting op gaan draaien.

Deze methode heeft als nadeel dat alleen de spelings van de laatste stappen opgeheven worden. De spelings van de eerdere stappen zijn echter al zo sterk gereduceerd dat dit meestal geen bezwaar is. Door dit principe toe te passen bij sterk reducerende overbrengingen is de extra last van de toegevoegde motor verwaarloosbaar vergeleken met de belasting ten gevolge van de last.

Deze methode wordt vooral toegepast als er veel overbrengingen zijn in het langzaam draaiende eindgedeelte. Hierbij mogen de belastingen niet te zwaar zijn, daar dan ook een grote 'anti-spling'-motor geïnstalleerd moet worden, wat zware belastingen tot gevolg heeft.

De extra motor heeft bovendien het nadeel dat hij extra ruimte en elektriciteit nodig heeft. Bovendien is de aanschaf ook een niet te verwaarlozen kostenfactor.

De extra motor heeft echter ook een groot voordeel. Dit is namelijk de enige methode waarbij de spelingsreductie met het omzetten van een schakelaar in- of uitgeschakeld kan worden, wat erg handig is met het oog op de levensduur van de overbrenging.

2.7 Voorgespannen assen

Een logisch vervolg op de eerste constructie, waarbij de assen verschuifbaar ten opzichte van elkaar waren gemonteerd, is de constructie met voorgespannen assen. Hierbij worden de tandwielen door verende elementen tegen elkaar gedrukt. Het kleinste tandwiel wordt hierbij meestal verplaatsbaar gemaakt.

De voordelen van deze constructie vergeleken met de voorgespannen gedeelde tandwielen zijn:

- 1) De tandwielen hebben maar een enkele breedte nodig.
- 2) Deze methode is niet alleen beperkt tot eenvoudige tandwielen, maar kan ook toegepast worden voor andere soorten overbrengingen, zoals worm- overbrengingen en kruiskoppelingen met kegelvormige tandwielen.
- 3) De vereiste veerkracht hoeft maar een fractie van de over te brengen kracht te zijn. Deze wordt verder niet beïnvloedt door de belasting.

Nadelen zijn er daarentegen ook:

- 1) De noodzaak van een schuivende schacht kan een serieus ontwerp-obstakel zijn.
- 2) Goede veerspanning is meestal alleen over kleine afstanden beschikbaar.
- 3) Bij een overbrenging met meerdere tandwielen is deze constructie meestal niet eenvoudig toe te passen, omdat bij andere tandwielparen dan grotere krachten en spelingen op kunnen treden.
- 4) Een defekte veer leidt hier tot grotere fout in de speling als bij de gedeelde tandwielen.
- 5) Alleen de variabele faktor wordt gekompenseerd.

2.8 Selektieve assemblage

Bij grote productie aantallen kunnen de verschillende transmissie-onderdelen in verschillende klassen onderverdeeld worden. Bij montage kunnen dan passende onderdelen bij elkaar gezocht worden.

De voordelen van deze methode moeten gezocht worden in de feiten dat er geen extra constructie-delen nodig zijn en dat deze methode niet alleen voor 'normale' tandwielen geschikt is, voor wormwielen is dit bijvoorbeeld ook een geschikte methode.

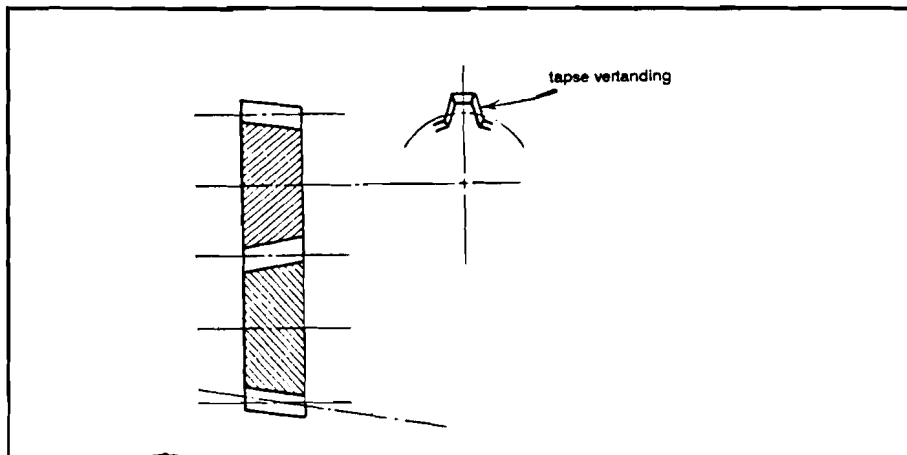
Nadelen zijn er ook legio:

- 1) Grote productie-aantallen zijn een vereiste.
- 2) De onderdelen moeten gemeten en in klassen ingedeeld worden.
- 3) Variabele spelingsoorzaken die uit de rotatie voortkomen kunnen zo niet geëlimineerd worden.
- 4) De onderdelen zijn niet meer klakkeloos uitwisselbaar, wat bij reparatie problemen op kan leveren.

2.9 Tapse tanden

Tapse tanden bieden ook mogelijkheden voor spelingsvrije tandwieloverbrengingen.

Als twee tandwielen met tapse tanden gekombineerd worden, kan door axiale verschuiving van de tandwielen ten opzicht van elkaar de speling verkleind worden.



Afbeelding 18 Tapse veranding

Voordelen:

- 1) Alle spelingen, behalve die variabel zijn met de rotatie, worden geëlimineerd.
- 2) De verkleining van de speling is klein vergeleken bij de axiale verschuiving. Het afstellen van de speling wordt hierdoor vereenvoudigd.
- 3) De onderdelen zijn eenvoudig monteerbaar en demonteerbaar. Bovendien is er geen probleem met uitwisseling. Dit in tegenstelling tot de vorige methode.
- 4) Onafhankelijk van de produktienauwkeurigheid kunnen de tandwielen toch spelingsvrij gemonteerd worden.

Uiteraard kent ook deze methode nadelen:

- 1) Voor de productie van deze tandwielen zijn speciale gereedschappen nodig, waardoor ze vrij duur zijn.
- 2) Voor inspectie van de tandwielen is duur gereedschap met zeer nauwkeurige tapse veranding nodig.
- 3) Axiale speling moet voorkomen worden.

2.10 Spelingsvrije wormwieloverbrengingen

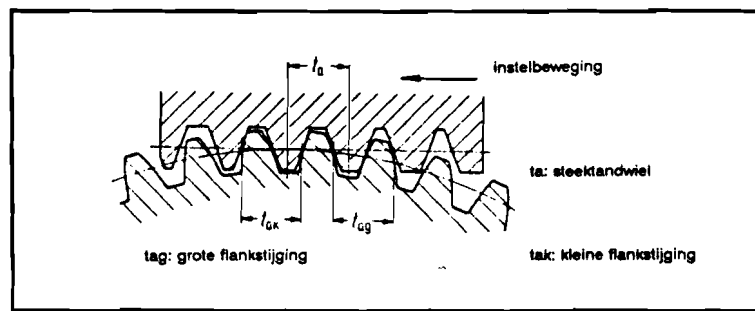
Tot nu toe zijn methodes besproken waarmee tandwieloverbrengingen spelingsvrij of -arm gemaakt kunnen worden. Indien de methode ook geschikt was voor andere soorten overbrengingen werd dat vermeld. In deze paragraaf worden methoden beschreven die speciaal geschikt zijn voor wormwieloverbrengingen.

2.10.1 Voorgespannen gedeelde worm

Het principe is hetzelfde als bij de gedeelde tandwielen. Deze methode is mogelijk maar vanwege de grote wrijving en tandkrachten moet zij gezien worden als een uitvlucht voor het geval andere methoden absoluut niet mogelijk zijn.

2.10.2 Worm met variabele tanddikte

Hierbij wordt een worm met variërende tandbreedte of tapse vertanding gebruikt. De speling kan dan afgeregeld worden door het ingrijpende tandwiel axiaal langs de worm te verschuiven, of door de worm te verschuiven.



Afbeelding 19 Wormoverbrenging met variabele vertanding

De voordelen liggen bij de feiten dat:

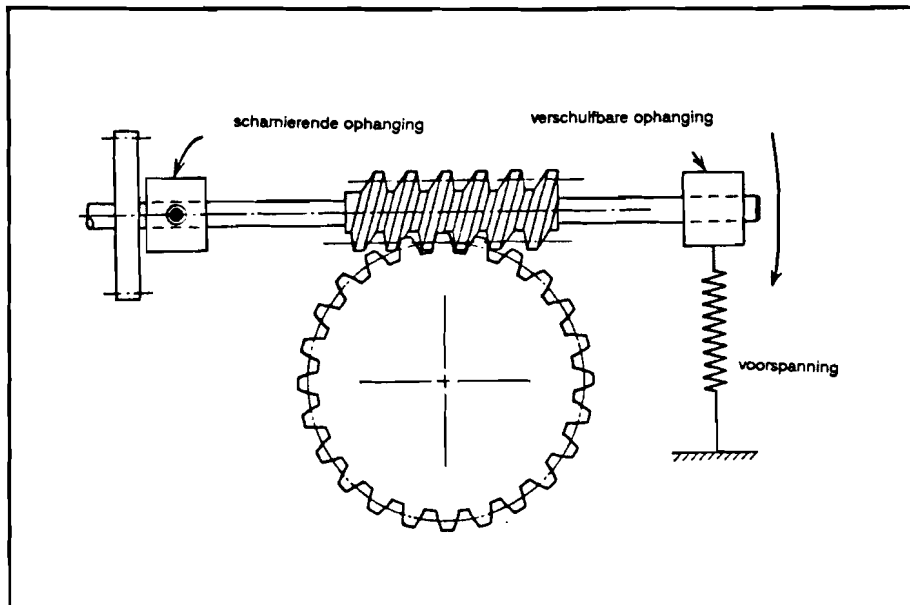
- 1) Er geen extra onderdelen nodig zijn.
- 2) Er geen extra ruimte nodig is.
- 3) Er in onbelaste toestand geen tandspanning is.
- 4) Deze overbrenging ook geschikt is voor zwaardere belastingen.

De nadelen moet gezocht worden bij de feiten dat:

- 1) Er speciale machines nodig zijn om de worm te fabriceren.
- 2) Alleen de konstante factoren van de speling worden opgeheven. De variabele speling blijft bestaan. Door de variabele vertanding is de snelheid zelfs niet konstant.
- 3) De variabele vertanding een kleine variabele speling veroorzaakt.

2.10.3 Met veren voorgespannen scharnierende worm

Hierbij wordt het wormwiel door een veer vaster op het tandwiel gedrukt, waardoor alle speling, ook de variabele, verdwijnt. Deze methode heeft de gebruikelijke nadelen van voorspannen. Daarbij komt nog het nadeel dat deze constructie erg veel wrijving heeft. Verder kan de scharnierende constructie problemen opleveren bij het ontwerp en de montage.



Afbeelding 20 Voorgespannen scharnierende worm

2.11 Overige, niet geschikte, principes

Nu volgt een opsomming van mogelijke oplossingen voor het spelingsprobleem, die op het eerste gezicht logisch lijken, maar die bij nadere beschouwing niet geschikt blijken, omdat ze moeilijk af te regelen zijn en erg slijtagegevoelig zijn. Deze methoden kunnen in de praktijk dus beter niet toegepast worden.

2.11.1 Overmaatse tanden

In principe is het mogelijk speling te voorkomen door tandwielen met een fractie te grote tanden toe te passen. Dit in de hoop dat slijtage er voor zorgt dat na verloop van tijd een goedlopende spelingsvrije overbrenging ontstaat. Nadelen zijn de erg grote vervormingen en slijtage, die vanwege het slijtagegruis dat ontstaat bijna niet te stoppen is.

2.11.2 Assen licht kruisen

Hierbij worden de assen na montage bewust uit het lood gezet, waardoor de tanden als het ware in elkaar wringen. Hierdoor wordt in feite de effectieve tandbreedte groter. Het nadeel berust in het feit dat er nu geen sprake meer is van lijncontact, maar van puntcontact, met alle problemen van dien.

2.11.3 Toepassen van smeermiddelen

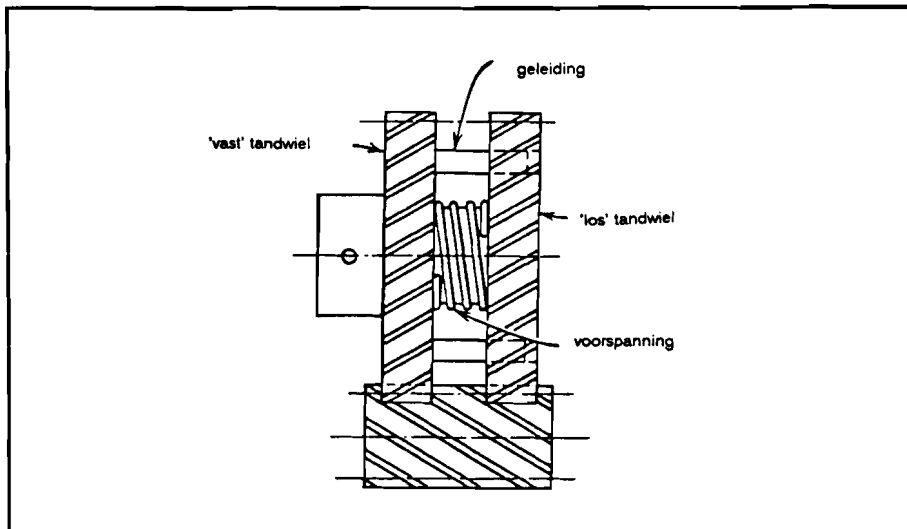
Door het toepassen van smeermiddelen wordt de effectieve tanddikte ook vergroot, dit doordat er een dun laagje aan de oppervlakte blijft kleven. Deze methode is niet betrouwbaar om met de belasting en

de temperatuur ook de filmdikte varieert.

Bovendien moeten hiervoor extra viskeuze smeermiddelen gebruikt worden, waardoor de wrijving onnodig vergroot wordt.

2.11.4 Axiaal voorgespannen schuine ver tanding

Schuine vertanding kan in principe axiaal voorgespannen worden. Zie afbeelding 21. Hoe kleiner de hoek van de vertanding is, hoe kleiner de voorspankracht kan zijn.



Afbeelding 21 Axiaal voorgespannen schuine vertanding

Deze methode wordt niet aangeraden omdat deze ze geen voordelen heeft boven gedeelde, voorgespannen tandwielen met normale vertandingen die veel goedkoper zijn.

Literatuur

- [1] Diversen, Ingenious Mechanisms for designers and inventors. Industrial Press Ink. 1954.
- [2] Hoek, prof.ir.W.van der, Des Duivels Prentenboek. Diktaat 4007, Technische Universiteit Eindhoven.
- [3] Krause, W, Konstruktionselemente der Feinmechanik
- [4] Michalek, Georg.W, Precision Gearing, Theory and Practice. John Wiley & Sons Ink., New York Londen Sydney.
- [5] Wolf, prof.dr.ir.A.van der, Werktuigen voor de machinefabriek. Diktaat 4626, Technische Universiteit Eindhoven.

Artikelen

- [1] Spielarme Cyklo-Getriebe -Aufbau, Funktion und Anwendung in der Automatisierungstechnik - Chr Mayer
[Antriebstechnik 4 - 1987]
- [2] Spielarme Schneckengetriebe - R.Schuhmann
[Antriebstechnik 11 - 1986]
- [3] Spielarme Schneckengetriebe
[Konstruktion 7 - 1986]
- [4] Aandrijving Daihatsu Feroza - Dick Schornagel
[Auto+Motor Techniek 9 - 1989]
- [5] Spielfreies Planetengetriebe - Theobalt Humbert
[Antriebstechnik 7 - 1989]

Samenvatting

Speling kan grof beschouwd gezien worden als verlies van beweging bij het omkeren van de draairichting.

Om speling te vermijden moeten de tanden van elkaar ingrijpende tandwielen precies in elkaar passen. In de praktijk is dit meestal niet het geval omdat de tanden niet exakt zijn geproduceerd en omdat de asafstand van de ideale maat afwijkt.

Als er een spelingsvrije overbrenging gewenst wordt dan komt het er op neer dat de effectieve tanddiktes van de afzonderlijke tandwielen op elkaar afgestemd moeten zijn.

De meeste oplossingen voor spelingsvrije overbrengingen berusten op het principe dat na montage de effectieve tanddikte van één tandwiel geregeld kan worden.

De beste spelingsvrijheid hebben de konstrukties waarbij de effectieve tanddikte van een tandwiel kontinu aangepast wordt met behulp van voorspanning tussen een vast en een los gedeelte van het tandwiel (zie afbeelding). Het nadeel van deze methoden is echter dat ze niet geschikt zijn voor zware belastingen, omdat de voorspanning even groot moet zijn als de zwaarste belasting.

Voor zwaardere belastingen is het aantrekkelijker een konstruktie toe te passen, waarvan de effectieve tanddikte periodiek bijgesteld kan worden. Dit heeft als nadeel dat er een kleine variabele spelingsfaktor overblijft. Het heeft echter het grote voordeel dat de konstruktie niet zwaar belast wordt als het niet nodig is.

In de loop der tijd zijn er met behulp van deze twee principes verschillende konstruktieve oplossingen gevonden voor het spelingsprobleem. Deze worden in hoofdstuk 2 beschreven. Er zijn echter ook methoden ontwikkeld die minder geschikt zijn. Deze zijn in hoofdstuk 3 beschreven.