

Ontwikkeling van vliegwieltechnologie

Dr.ir. W.A. van Kampen T.H. Delft

Samenvatting

Door de verhoging van de energieprijzen is de toepassing van vliegwiel als middel om de energiehuishouding te verbeteren in de hernieuwde belangstelling gekomen. Deze belangstelling valt samen met recente ontwikkelingen in elektrische en mechanische systemen waardoor vliegwielssystemen economisch inzetbaar worden. In moderne vliegwiel-systemen worden technieken gebruikt die van toepassing zullen zijn in nieuwe industriële producten

Inleiding

Het vliegwiel is van oudsher gebruikt als energiebuffer in mechanische systemen, lang voordat begrippen als energieinhoud en energetisch vermogen in hun huidige betekenis bekend waren. In het pottemakerswiel wordt mechanische energie, geleverd door de voeten van de pottebakker, opgespaard en worden belastingsstoten bij het vervormen van de klei van het werkstuk opgevangen zonder dat de gelijkmatige gang van het wiel merkbaar verandert. Ook bij de stoommachine en de verbrandingsmotor wordt de bufferwerking van het vliegwiel systeem langs alleen mechanische weg verkregen. Een meer recente toepassing van vliegwiel is in elektromechanische systemen, waarbij het vliegwiel is geïntegreerd met een elektrische motor-generator, zie figuur 1.

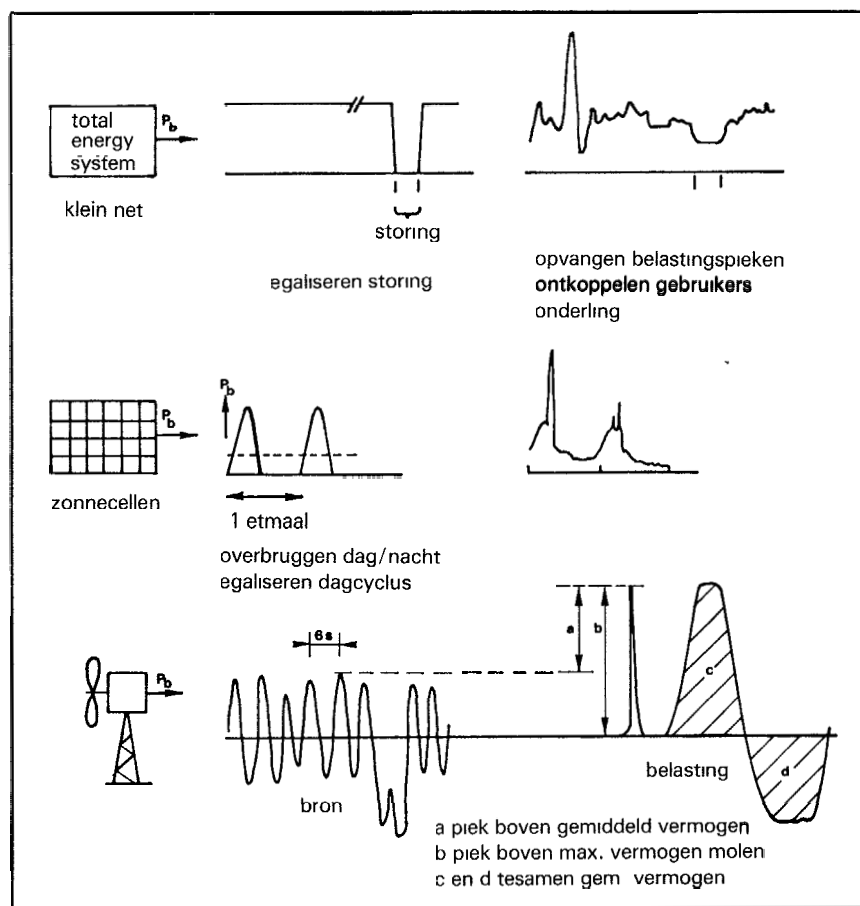
Bij een alleen mechanisch systeem zal de vliegwielas naar buiten leiden, bij een elektromechanisch systeem kan de koppeling met de buitenwereld langs elektrische weg plaatsvinden. We zullen hier bijzondere aandacht aan elektromechanische vliegwielssystemen verlenen, om redenen die later duidelijk zullen worden. Een aantal beperkingen, die voorheen bestonden bij het gebruik van vliegwiel-

len zijn door recente ontwikkelingen weggenomen. Op het gebied van de werktuigbouwkunde zijn lichte en sterke materialen beschikbaar zoals kunststofvezels, en zijn nieuwe technieken voor het verbinden van materialen ontwikkeld, zoals lijmen, elektron-welding etc. In de elektrotechniek heeft een doorbraak plaatsgevonden bij de regeling van elektrische energiestromen door het verschijnen van halfgeleider energieventielen zoals transistoren en thyristoren

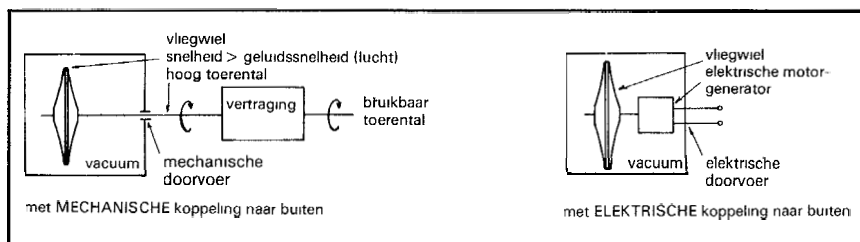
Hierdoor is de ontwikkeling van geïntegreerde elektromechanische systemen in een stroomversnelling gekomen, zoals bij elektromechanische werktuigen, tractie, magnetische lagere, robotica.

De functie van vliegwielssystemen

Deze kan worden omschreven als het aanpassen van vraag naar en aanbod van vermogen, d.i. energie per tijdseenheid, zie figuur 2.



Figuur 2 Functie vliegwielssystemen: aanpassen van vraag en aanbod van vermogen



Figuur 1 Vliegwielstelsel

Aan de aanbodzijde is vermogen vaak niet doorlopend beschikbaar, maar met tussenpozen of wordt zelfs vermogen afwisselend geleverd en gevraagd. Voert men een begrip periodetijd aan de aanbodzijde in, T_a , waaronder zal worden verstaan de tijd waarover het vliegwiel

energie moet kunnen bijleveren, dan blijkt deze tijd sterk uiteen te kunnen lopen. Een windmolen levert energie met fluctuaties van enkele seconden. Zonnecellen zijn gesynchroniseerd met de dag-nachtcyclus van 24 uur. Bij tractie, stadsbussen, stoptreinmaterieel, wordt remenergie in de orde van een minuut geleverd. Brandstofcellen zal men proberen continu te laten functioneren.

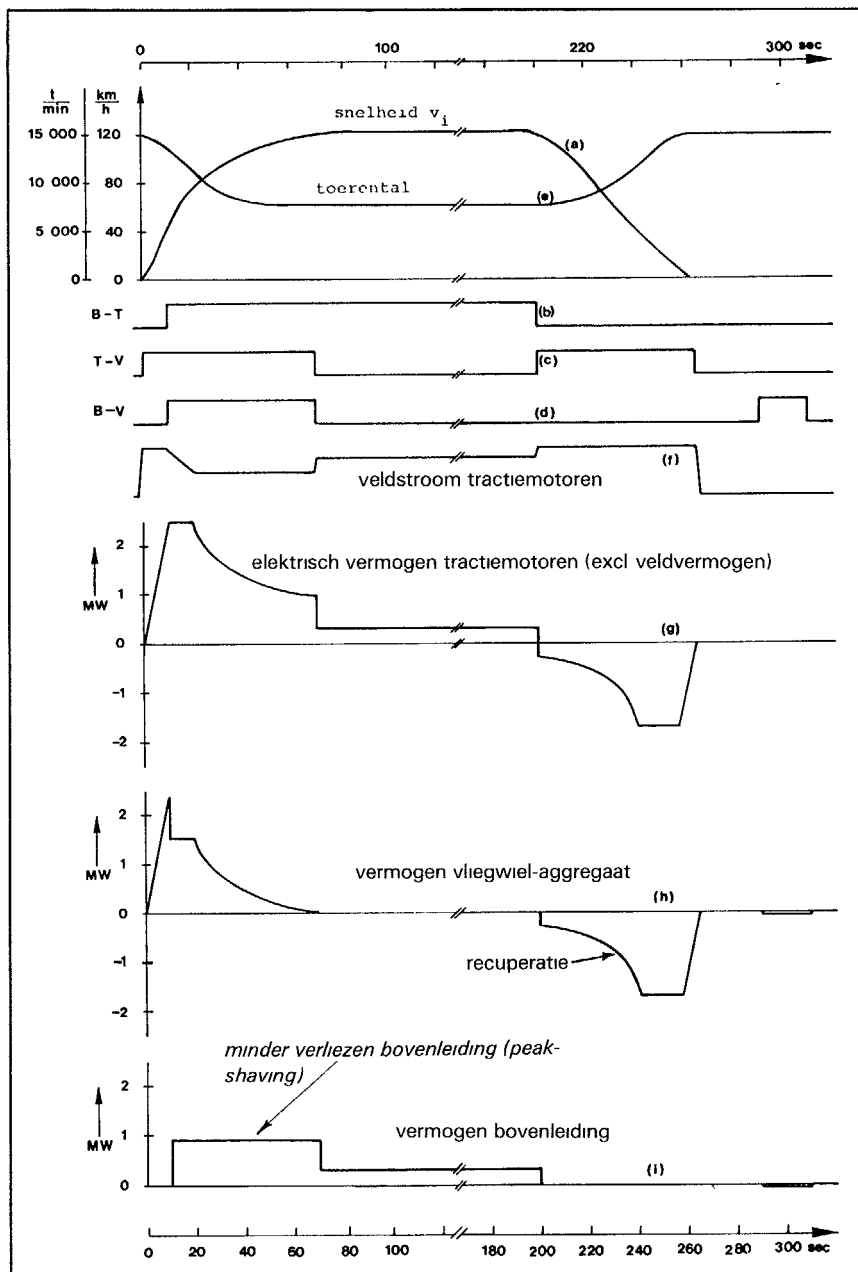
Aan de *vraagzijde* kan het gebruik van elektrische energie een grillig verloop hebben, zoals bij het inschakelen van pompen of gereedschapsmachines in kleine netten. De periodetijd aan de vraagzijde, T_v , hangt hier ook af van het doel dat men stelt bij gebruik van een vliegwielsysteem, b.v. het opvangen van inschakelstoten of het afvlakken van onregelmatig energieverbruik door een wisselend aantal gebruikers met verschillende vermogens. Denkt men aan verlichting van maritieme bakens, dan is de periodetijd aan de vraagzijde ca. 12 uur, bij tractie ca. 1 min. zie figuur 3. Overziet men de hierboven genoemde toepassingen, dan is een vliegwielsysteem een energiebuffer waarvan de volgende functies kunnen worden onderscheiden:

1. het leveren van vermogen als de primaire bron geen vermogen levert, of tijdelijk vermogen opneemt,
 2. het leveren van vermogen als de belasting hoger is dan wat de bron op dat moment kan leveren.
 3. het opnemen van vermogen als de primaire bron meer vermogen levert dan de belasting opneemt,
 4. het opnemen van vermogen als de belasting vermogen teruglevert.
- De tijdschaal waarover deze functies aanwezig zijn is met de grootte van het vermogen bepalend voor de omvang van het vliegwielsysteem.

De gevolgen van deze vliegwielfuncties zijn.

ad 1. vermogen is doorlopend beschikbaar, zowel aan bron als lastkant; als deze functie noodzakelijk is, moet een energiebuffer worden toegepast.

ad 2. de primaire bron hoeft niet het maximum optredende vermogen te kunnen leveren en kan dus kleiner worden gedimensioneerd. Voor verbrandingsmotoren heeft dit tot gevolg dat over langere perioden de motor zwaarder wordt belast, wat het rendement ten goede komt. Een kleinere primaire bron betekent lagere investeringskosten voor die bron, welke kunnen worden afgewogen tegen die van het buffersysteem.



Figuur 3 Tijddiagram van de rijcyclus van een 'Sprinter' van de Nederlandse Spoorwegen

ad 3. de primaire bron hoeft niet teruggeregeld te worden steeds als de bron meer levert dan de belasting opneemt. In gevallen dat de bron niet kan worden teruggeregeld, hoeft de energie niet ongebruikt te worden afgevoerd. Deze functie komt de energiehuishouding ten goede en heeft meestal energiebesparing en lagere investeringskosten in de bron ten gevolge.

ad 4. de last hoeft niet ingericht te worden voor het opnemen van overtollige energie. Dit inrichten betekent meestal het dissiperen van de energie. Kan de energie door een buffer zoals een vliegwielsysteem worden opgenomen, dan vindt z.g. recuperatie plaats, welke di-

rekt de energiekosten van de installatie drukken. Daarnaast vindt nauwelijks de warmteontwikkeling of slijtage plaats, die met dissipatie van energie gepaard gaat.

Het vlieg wiel

De bewegingsenergie die in een vlieg wiel is opgeslagen is te berekenen uit $\Sigma \frac{1}{2} m_i v_i^2$, waarin v_i de snelheid van een massadeeltje m_i is. Aangezien de snelheid aan de omtrek van het draaiende wiel het grootst is, zou men verwachten dat bij vliegwielen vrijwel alle massa aan de omtrek wordt gevonden. Dit is over het algemeen niet het geval.

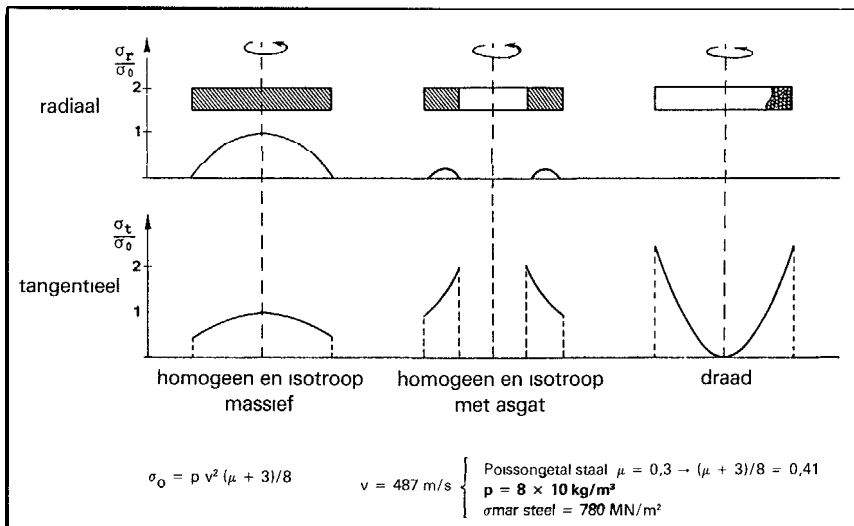
Heeft men de vrijheid om materiaal en

toerental van een vliegwiel te kiezen, dan zal men trachten, de energieinhoud van een vliegwiel voor een gegeven massa zo groot mogelijk te maken. De energieinhoud is groter, naarmate het vliegwiel sneller draait en wordt dus begrensd door het toerental dat op veilige wijze kan worden toegepast. Hiertoe is bepalend de maximum mechanische spanning die in het vliegwiel optreedt. Vergelijken we vliegwielvormen van verschillende vorm met elkaar, zie figuur 4, dan blijkt dat de mechanische spanningen sterk uiteenlopen. Bij draad treedt aan de omtrek de hoogste spanning op. De spanning is terug te brengen door radiaal krachten te laten opnemen met meer naar binnen gelegen materiaal, zoals gebeurt in de ring en nog beter in de schijf zonder asgat. Berekend kan worden, dat ondanks het toevoegen van het meer naar binnen gelegen materiaal, het aan de buitenzijde bewegende materiaal zoveel sneller kan gaan zonder te bezwijken, dat voor hetzelfde gewicht de meeste energie in het massieve vliegwiel kan worden opgeslagen. Het loont zelfs, de kern zwaarder uit te voeren. In een vrijwel optimale uitvoering voor homogeen en isotroop materiaal, bij de z g afgeknotte Lavalschijf, is het vliegwiel aan de omtrek dun en bij de as dik, zie figuur 5.

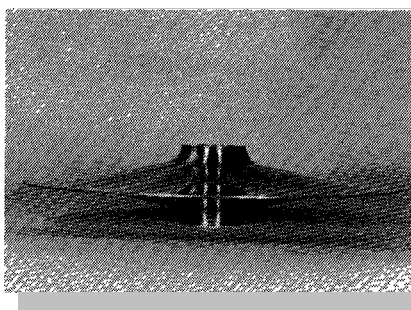
Om een vliegwiel te construeren dat een grote energieinhoud heeft per kg massa zoekt men naar een materiaal dat sterk is relatief t.o.v. zijn massa, dus met een hoge verhouding van σ/ρ , waarin σ de toelaatbare materiaalspanning is en ρ de massa per m^3 , verg. de formule in figuur 3. Voor kunststofvezels is deze verhouding vaak hoger dan voor staal, zodat een vliegwiel uit kunststofvezel een hogere energieinhoud per kg massa kan hebben dan een stalen vliegwiel. Over het algemeen zal zo een wiel wel meer ruimte innemen door de lagere specifieke dichtheid van kunststoffen t.o.v. staal.

Bepaalt men met de genoemde formule hoe groot de snelheid aan de omtrek van een vliegwiel kan zijn, v , bij een goede staalsoort of bij kunststofvezel, $\mu^2 < 1$, dan blijkt dat de omtreksnelheid hoger is dan de geluidssnelheid in lucht, n.l. 500-700 m/s.

Maakt men gebruik van niet-isotrope materialen, zoals de meeste kunststofvezels, dan ontstaat een zeer gecompliceerde spanningstoestand. De opgave is dan, een zodanig vliegwiel samen te stellen, dat een optimaal gebruik gemaakt wordt van het materiaal. Afhankelijk van de toepassing kan daarbij als zwaarst



figuur 4 Radiale en tangentele spanningen in vliegwielvormen



figuur 5 Afgeknotte Lavalschijf

regende factor de betrouwbaarheid, de systeemkosten of de energieinhoud per massa-eenheid gelden.

De hierboven genoemde hoge omtreksnelheid van vliegwielvormen als het materiaal volledig wordt benut, heeft een aantal gevolgen voor de constructie van vliegwiel-systemen.

bij handzame afmetingen van het vliegwiel, ca. 50 cm diameter, is het toerental hoog, ca. 20.000-25.000 toeren/min,

het is noodzakelijk het vliegwiel in vacuüm of eventueel in een licht gas (waterstof, helium), te laten draaien,

koppeling met mechanische werktuigen is minder eenvoudig,

koppeling met elektrische aandrijvingen wordt aantrekkelijker,

de lagering en uitbalancering vormt een probleem.

er is echter hier dat moderne elektro-mechanische hulpmiddelen kunnen worden ingezet

De elektrische motor-generator

voor de genoemde toerentalen van 20.000-25.000 toeren/min komen slechts borstelloze elektrische machines

in aanmerking, ook omdat dan in vacuüm kan worden gewerkt. Met behulp van vermogenselektronica kunnen wisselstromen met een instelbare frequentie worden opgewekt, waarmee een draaiveld voor de genoemde toerentalen kan worden gegenereerd. Toegepaste motor-generator typen zijn vooral die van de synchrone machine in verschillende uitvoeringen. De verschillen betreffen vooral de wijze waarop het veld van de rotor wordt opgewekt. Dit kan gebeuren met een hulp magnetisch circuit in de stator, waarmee de rotor wordt gemagnetiseerd. In dat geval kan de rotor geheel uit stalen delen bestaan, type Nadyne, Statexyn. Ook wordt een hulpgenerator toegepast waarmee elektrische stromen in een rotorwikkeling worden opgewekt die worden gelijkgericht met halfgeleiderdioden. De toepassing van permanente magneten is eveneens mogelijk. Al deze constructies hebben hun voor- en nadelen, waarop we hier niet verder zullen ingaan. Dit gebied is nog in volle ontwikkeling, vooral in de U.S.A., waar al deze typen motoren, die ook als generator kunnen fungeren, in onderzoek zijn met het oog op toepassing in vliegwiel-systemen.

Hoewel de technologische problemen die bij deze typen motoren optreden aanzienlijk zijn, waarbij het er naar uitziet dat de problemen opgelost worden, is het aantrekkelijke van deze snellopende elektrische machines dat hun afmetingen relatief klein zijn ten opzichte van het vermogen. Uiteindelijk zal dit tot gevolg hebben dat de snellopende elektromotoren goedkoper zullen zijn dan de conventionele langzaam lopende elektromotoren, ondanks de noodzakelijk toe te voegen vermogenselektronica. De meeste

vermogenselektronische systemen zijn nog in het ontwikkelstadium, zodat een sterke prijsdaling verwacht kan worden.

Het magnetisch lager

De laging van sneldraaiende rotoren met een aanzienlijke massa en in vacuüm is moeilijk uitvoerbaar met conventionele rollenlagers. Bij voorkeur zal men een rollenlager niet in vacuüm opstellen, waardoor een doorvoerprobleem wordt geschapen. Door de hoge toerentallen vormen de uitbalancerings en het gedrag bij kritische toerentallen een probleem. Men ziet rollenlagers toegepast, die in verende en dempende constructies zijn opgenomen om trillingen te voorkomen, waarbij men ook aan onbalans aandacht moet geven. De meeste van deze problemen worden opgelost met het actieve magnetische lager, waarbij de rotor wordt ondersteund, of beter opgehangen, met elektromagneten, waarvan de stroom wordt geregeld afhankelijk van de positie van de rotor ten opzichte van het huis. Ook deze oplossing is mogelijk geworden door de vermogenselektronika, omdat de bekrachtiging van elektromagneten, en in dit geval in een regelsysteem, met halfgeleider schakelementen zoals transistoren economisch mogelijk is. Een nadeel van het magnetisch lager is de noodzaak vermogens-

elektronika te moeten toepassen, maar daar staan een groot aantal voordelen tegenover. Magnetische lagers zijn toepasbaar in vacuüm, in chemisch agressieve atmosfeer, vertonen weinig wrijving, hebben een hoge levensduur, zijn makkelijk te monteren. De lagers zijn inzetbaar waar andere lagertypen niet of minder in aanmerking komen. De belangrijkste eigenschap van het magnetisch lager is de mogelijkheid, een zekere mate van niet uitgebalanceerd zijn van de rotor te kunnen accepteren; in dat geval gaat de rotor draaien om zijn werkelijke hoofdtraagheidsas zonder daarbij grote lagerkrachten op te wekken. Deze eigenschap maken het lager bijzonder geschikt voor hoogtoerige toepassingen, waarbij constructies kunnen worden toegepast, bijvoorbeeld van kunststof vliegwielen of draadgewonden vliegwielen, waarvan de hoofdtraagheidsas, of meerdere, een niet geheel konstante positie in het rotorlichaam hebben.

Vliegwielenonderzoek in Nederland

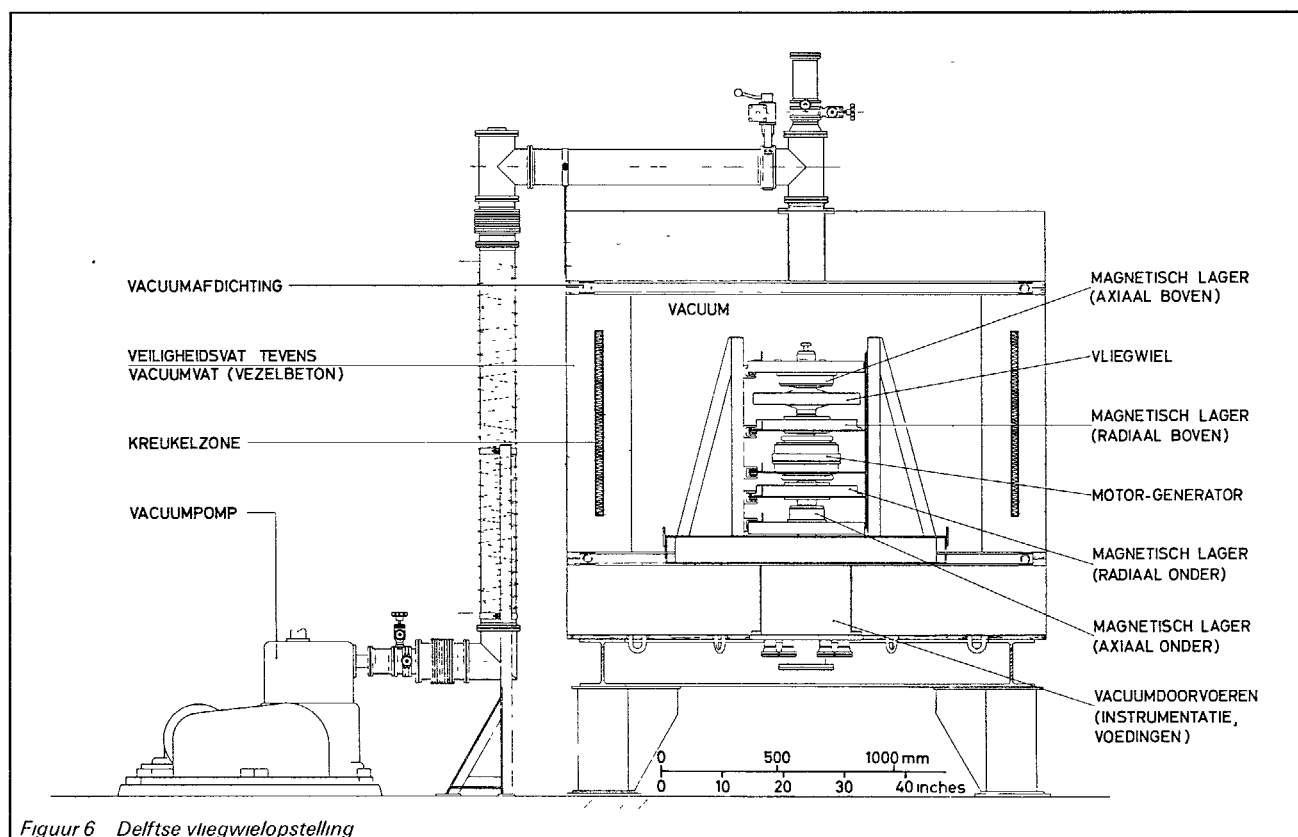
Onderzoek naar vliegwielsystemen heeft voornamelijk plaatsgehad in de T.H. Delft, welke met een aantal partners buiten de T.H. heeft samengewerkt, zie figuur 6.

In het bijzonder hebben de firma Fokker B.V. te Amsterdam en de K.M.A. te Breda bijgedragen aan resp. de ontwikkeling van een kunststofvlieg wiel en de ontwikkeling van slagvaste en vacuümdichte afschermingen. Onderzoek naar vliegwielen heeft ook plaatsgehad bij T.N.O. Mede door de moeilijke financiële positie van de overheid is het vliegwielenonderzoek de laatste tijd getemporeerd. Dit is jammer, omdat vliegwielsystemen niet alleen energiebesparing opleveren, maar ook omdat de toepassing van vliegwielsystemen voor de industrie de mogelijkheid biedt nieuwe technologie te verwerven.

Wetenschappelijk is de dynamica van deze systemen interessant en van direct belang als men tot een succesvolle technische realisering wil komen. Hierbij kan profijt worden getrokken van het dynamisch onderzoek dat heeft plaatsgevonden in de ruimtevaart.

Conclusies

1. Vliegwielsystemen met elektrische koppeling naar buiten vormen opslagsystemen die toepasbaar zijn op een eigen gebied.
2. In elektromechanische vliegwielsystemen worden voor de nederlandse industrie van belang zijnde technieken gebruikt.



Figuur 6 Delftse vliegwielopstelling