

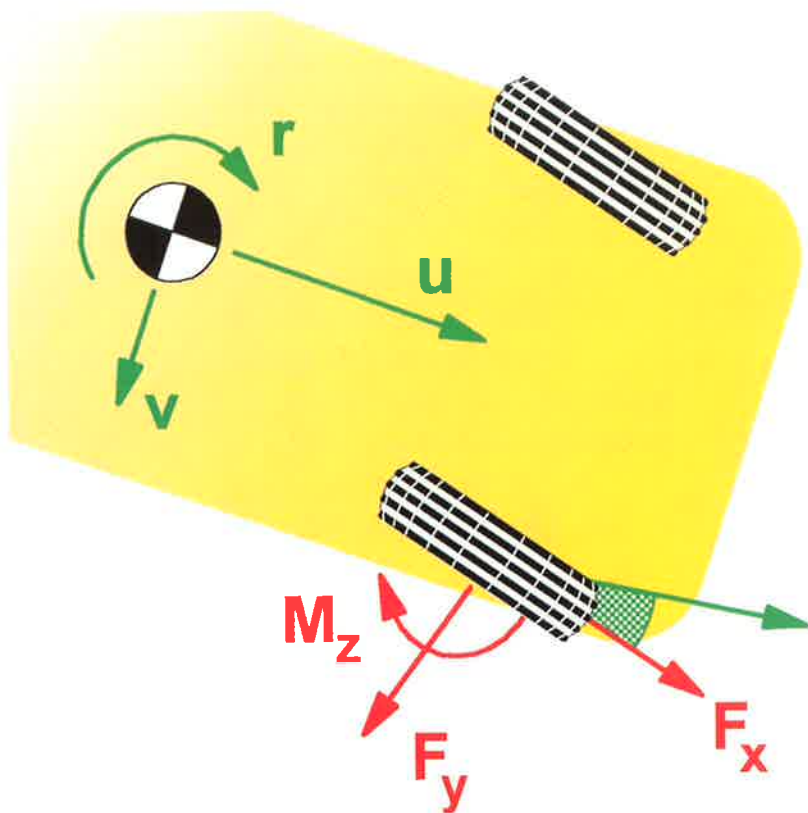
# wielen *wheels*

Afscheidsrede

*Farewell Address*

Prof. dr.ir. dr.h.c. Hans B. Paceyka

mei 1996



# **Wielen**

## **Wheels**

### **Afscheidsrede**

uitgesproken op 22 mei 1996,  
door prof. dr. ir. Hans B. Pacejka,  
hoogleraar in de Voertuigtechniek  
bij de faculteit der Werktuigbouwkunde  
en Maritieme Techniek  
van de Technische Universiteit Delft.

### ***Farewell address***

*presented on May 22, 1996,  
by Prof. Dr. Ir. Hans B. Pacejka,  
professor of Vehicle System Engineering  
at the Faculty of Mechanical Engineering  
and Marine Technology  
of the Delft University of Technology.*

Vormgeving/Design: J. W. A. Borsboom  
Drukwerk/Printing: Universiteitsdrukkerij TU Delft  
© Copyright 1996: H. B. Pacejka, Rotterdam, The Netherlands.

Mijnheer de Rector Magnificus,  
Mijnheer de Decaan van de Faculteit der Werktuig-  
bouwkunde en Maritieme Techniek  
Collegae Hoogleraren,  
Leden van de Universiteitsgemeenschap,  
Studenten en oud-Studenten,  
Gewaardeerde gasten en beste vrienden,  
Dames en Heren, geachte toehoorders,

*Your magnificent, Rector of the Delft University  
of Technology,  
Dean of the Faculty of Mechanical Engineering  
and Marine Technology,  
Colleague professors,  
Members of the University Community,  
Students and former students,  
Guests and friends,  
Ladies and Gentlemen,*

## 30 years Vehicle Dynamics in Delft

Wheels are essential parts of a vehicle. They turn and roll while carrying the load and moving over a usually paved road. The way in which the wheel functions while rolling, how it generates forces and torques and transmits these to the wheel axle and how the tyre mechanical behaviour influences the motion of the vehicle are matters that formed a major part of the research performed at the Vehicle Research Laboratory of the Delft University of Technology during the last three or four decennia. Already in the mid-fifties my predecessor and colleague professor Van Eldik Thieme recognized the problematic nature connected with the pneumatic tyre. He has initiated important experimental research into the fundamental properties of the rolling tyre for which a number of special test rigs and tyre test vehicles were developed. The tyre was and still is not easily accessible for accurate mathematical model calculations. That is due to its complex structure with carcass, belt and tread pattern and the often large deformations in the region near the contact patch.

Parallel to this early work, professor De Pater initiated investigations into the behaviour of steel railway wheels. Kalker found his life's work in this subject. The steel wheel's homogeneous structure with relatively small deformations was better suited for accurate model calculations while on the other hand, experiments were very difficult to carry out. Kalker's mathematical models have become world famous and are commonly used in theoretical studies into the dynamic behaviour of railway vehicles.

Through these activities, Delft has become a known centre of scientific research into the behaviour of rolling, slipping and vibrating wheels. In our laboratory, this was done primarily to gain insight in its functioning and to describe its roll as a component of the vehicle. In a similar way, the suspension spring is of importance and for purposes of analysis one wishes to know the precise magnitude of the force that is needed to compress the spring over a given distance. Also for the tyre the assessment of such a spring characteristic is needed. This will then mainly concern its relation with the vertical dynamics of the vehicle and the connected vibrational comfort. The tyre, however, is made to perform also other very important tasks. Horizontal forces are to be generated to accelerate or brake the vehicle and to change its direction of motion. It is understood that the tyre is crucial in maintaining active traffic safety.

---

*During the presentation, the lecture was supported by animation and video pictures.*

## 30 jaar Voertuigdynamica in Delft

Wielen zijn essentiële onderdelen van een voertuig, ze draaien en rollen terwijl ze de last dragen en voortbewegen over een meestal geplaveide weg. Hoe het wiel precies functioneert tijdens het rollen, op welke manier het in staat is krachten en momenten over te brengen en hoe het de beweging van het voertuig beïnvloedt, zijn onderwerpen van studie geweest bij ons in het Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Universiteit in Delft. Het is een problematiek die reeds meer dan 40 jaar geleden door mijn voorganger professor Van Eldik Thieme werd onderkend. Hij heeft veel experimenteel onderzoek naar de fundamentele eigenschappen van de rollende band geïnitieerd en heeft daarvoor proefstanden en testvoertuigen ontwikkeld. De luchtband is niet zo eenvoudig toegankelijk voor nauwkeurige wiskundige modelberekeningen. Dit komt door de grote optredende vervormingen en de ingewikkelde opbouw van de band met zijn koordlagen en de loopvlakprofilering.

Parallel aan dit vroege werk heeft professor De Pater het onderzoek naar het gedrag van rollende stalen spoorwegwielen geïnitieerd. Kalker heeft hierin zijn levenswerk gevonden. Aan deze wielen met zijn homogene constructie en kleine vervormingen kon beter gerekend worden terwijl het doen van proeven juist zeer moeilijk was. Kalker's wiskundige modellen zijn beroemd en worden wereldwijd gebruikt voor het onderzoek naar het dynamisch gedrag van spoorwegvoertuigen.

Zo is er een Delfts wereldzwaartepunt ontstaan voor wat betreft het wetenschappelijk onderzoek naar het gedrag van rollende, slippende en trillende wielen. Dat onderzoek werd bij ons in de eerste plaats gedaan om kennis en begrip te verkrijgen over de rol die de band speelt als component van het voertuig. Zo is ook een veer een belangrijke component en men wil daarvan precies weten hoeveel kracht nodig is om de veer over een bepaalde lengte in te drukken. Van de band wil men dat ook weten. Maar dat betreft dan voornamelijk de verticale dynamica van het voertuig en het daarmee verband houdende trillingscomfort.

De band heeft echter nog een andere zeer belangrijke functie. Hij moet de horizontale krachten leveren die nodig zijn om het voertuig af te remmen, te versnellen of van richting te doen veranderen. Zo is de luchtband van cruciale betekenis voor de veiligheid en het comfort.

*Tijdens de presentatie werd de lezing ondersteund door animatie- en videobeelden.*

It is useful to think in terms of models when one tries to describe the behaviour of a system component such as the tyre. Different kinds of models exist. They are all brought in mathematical form, but may differ considerably in complexity, structure and purpose of use. Relatively simple models are used in the first place to get proper understanding in the way the tyre generates forces and moments. Beside these, models are available that are relatively precise and are suitable for simulating the tyre in a complete vehicle computer model. Finally, we have very accurate and complex models which since recent years have become available for the tyre designer. These models are based on powerful finite element computer codes and are able to calculate phenomena like stresses, wear and temperature that occur in the tyre while rolling and slipping, albeit at the expense of extreme lengths of computer calculation time.

Clear boundaries between these types of models do not always exist. The different categories may influence each other and may use similar modelling techniques. We have models that are purely based on the theory of the physical system and others that are purely empirical and are developed using experimental observations. Besides, mixed approaches may often be used.

To get a better understanding of how a tyre tries to resist a forced deviation from its original straight line motion, the simple spoke or brush type tyre model may be considered. The tips of the flexible spokes or bristles touch the road surface over a given contact length. When the wheel starts rolling, these elements will move from the front to the rear edge through the contact zone. If as a result of braking or an imposed lateral motion of the wheel axle, deviations occur from the original free rolling straight ahead motion, the elements will be forced to deflect horizontally. If, as in Fig. 1, the wheel drifts to the left, each new element that enters the contact zone at the leading edge will touch the road a little more to the left. Through this, a slip angle  $\alpha$  arises and a triangular deformation shape is created. And it is because of this shape that the side force  $F_y$  acts on the wheel a small distance behind the contact centre. This results in the so-called self-aligning torque  $M_z$ . A moment about the vertical axis that tries to steer the wheel towards the new direction of motion.

At increasing slip angle, the side force grows less than proportional due to the limited coefficient of friction. Sliding of the elements starts at the rear of the contact area. There, the imposed lateral deflection would become too large for the available frictional force to be maintained. After having reached a certain

Om het gedrag van de band te kunnen beschrijven is het goed om in modellen te denken. Er zijn verschillende soorten modellen denkbaar. Ze zijn allemaal in wiskundige vorm te brengen maar kunnen sterk verschillen in complexiteit, in structuur en in gebruiksdoel.

Zo kennen we betrekkelijk eenvoudige modellen die in de eerste plaats bedoeld zijn om inzicht te verwerven in sommige aspecten van het bandgedrag. Daarnaast zijn er modellen die redelijk nauwkeurig zijn en die we gebruiken om de rol van de band na te bootsen in complete dynamische voertuigmodellen. Tenslotte gebruikt de bandenindustrie sinds korte tijd zeer complexe modellen die speciaal ontwikkeld zijn om als hulpmiddel te dienen bij het ontwerpen van een nieuwe autoband. Deze modellen zijn gebaseerd op krachtige eindige-elementen-programmatuur. Zij zijn in staat verschijnselen als materiaalspanning, slijtage en lokale temperatuurontwikkeling uit te rekenen die in de rollende en slippende band kunnen ontstaan, zij het ten koste van extreme rekentijden.

Scherpe grenzen tussen deze categorieën bandmodellen zijn er niet. De modellen lopen ook qua methodiek in elkaar over en ze beïnvloeden elkaars ontwikkeling. Er zijn modellen die puur op de theorie van het fysische systeem zijn gebaseerd en andere die zuiver empirisch zijn. Daarnaast ziet men vaak mengvormen ontstaan.

Om een betere voorstelling te kunnen maken van de manier waarop de band zich schrap zet tegen een gedwongen zijdelingse afwijking van de beschreven baan wordt wel het spaak- of roterend borstelmodel gebruikt. De uiteinden van de elastisch vervormbare spaken maken contact met het wegdek over een bepaalde contactlengte. Als het wiel rolt dan bewegen deze elementen zich van voor naar achter door de contactzone heen. Gaat het wiel tengevolge van remmen, of door een opgelegde zijdelingse beweging van de wielas, afwijken van de oorspronkelijk vrij rollende rechthoekige beweging, dan zullen de spaak-elementen noodgedwongen in horizontale richting moeten gaan vervormen. Beweegt de wielas naar links zoals in *figuur 1* getoond, dan zal elk nieuw element, dat aan de voorkant de contactzone binnenkomt, steeds weer iets meer naar links contact maken met het wegdek. Er ontstaat dan een drifthoek  $\alpha$  en een driehoekig naar achtertoenemend vervormingsbeeld. De ontstane spoorkracht  $F_y$  grijpt daardoor iets achter het contactcentrum aan hetgeen resulteert in een zogenaamd richtmoment  $M_z$  dat het wiel naar de nieuwe bewegingsrichting toe wil sturen.



level of side slip, the tyre will slide over the complete contact patch and the side force will not increase further.

This simple tyre model is already capable of producing characteristics that look very similar to actually measured curves. However, the model is not sufficiently accurate to represent the actual tyre in a vehicle computer model with which quantitatively correct simulations are to be carried out sometimes under extreme handling conditions.

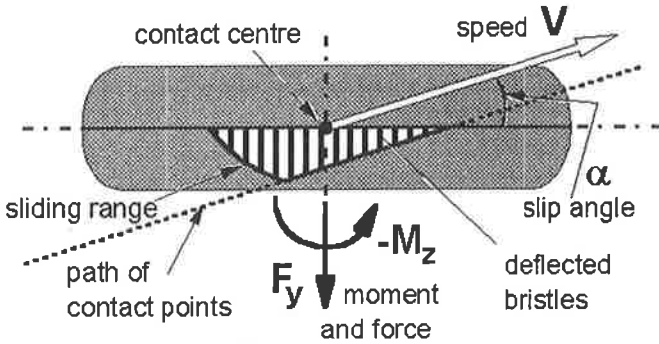
That would call for models based on measurements with the actual tyre. Tests may be conducted in the laboratory using special rigs where a drum or a flat belt replaces the actual road. Experiments on the road are preferred when feasible. The tyre test trailer of our laboratory offers various possibilities to test the tyre. The test wheel can be steered and braked at controlled vertical loading conditions. The wheel can be set at a desired camber angle and water may be sprayed to wet the road surface. Forces and moments are measured in special instrumented wheel hubs and the computer controls the entire test process. Afterwards, the various signals are processed and converted into graphs and formulae according to a chosen tyre model.

A mainly empirical model that is being used world-wide is the so-called '*Magic Formula Tyre Model*'. Its development started about ten years ago in a cooperative effort with Volvo in Sweden where Egbert Bakker was very much involved and did most of the work. The model is built around a formula that is based on a sine function with an arctangent function as its argument. The formula reads:

$$y = D \sin\{C \arctan\{Bx - E (Bx - \arctan Bx)\}\}$$

The four parameters  $B$ ,  $C$ ,  $D$  and  $E$  govern magnitude and shape of the resulting curve. Quantity  $y$  is the output to be calculated such as sideforce and braking force and  $x$  is the input that may be either the slip angle or the fore and aft slip. The formula appears to be most suitable to represent the slip characteristics of a tyre (*cf. Fig. 2*).

When a vehicle brakes while negotiating a curve both slip components are active at the same time. The description of this combined slip situation was originally based on physical reasoning. Recently however, Michelin made an important contribution. They accounted for the effect of combined slip by multiplying the original pure slip lateral and longitudinal force characteristics with empirical weighting functions. These weighting functions have a hill shape

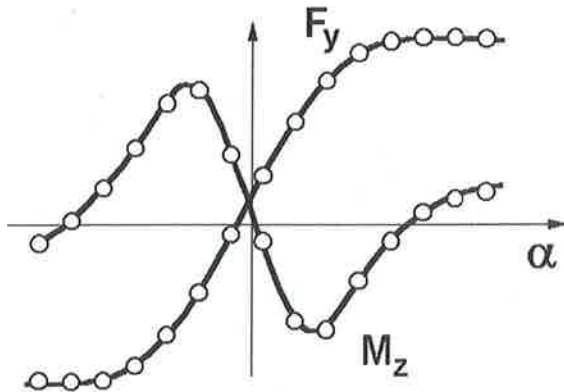


**Figuur 1:** Borstelmodel van de band rollend onder een drifthoek.  
**Figure 1:** Tyre brush model running at a slip angle.

Bij groter wordende drifthoek zal de spoorkracht minder dan proportioneel toenemen omdat tengevolge van de beperkte wrijvingscoëfficiënt glijden zal optreden. Dat begint aan de achterrand van het contactgebied waar de vervorming te groot zou zijn geworden. Na het bereiken van een bepaalde drifthoek zal de band in het gehele contactgebied gaan glijden en zal de kracht niet verder toenemen.

Dit simpele bandmodel is reeds in staat om karakteristieken te produceren die al veel lijken op gemeten verbanden. Het is echter onvoldoende nauwkeurig om te kunnen dienen in computermodellen van het voertuig waarmee kwantitatief correcte simulaties moeten kunnen worden uitgevoerd onder soms extreme manoeuvreercondities.

Daarvoor zijn rekenmodellen nodig die gebaseerd zijn op metingen aan de rollende band zelf. Metingen kunnen uitgevoerd worden in het laboratorium met proefstanden waarin een trommel of een eindloze band de plaats van de weg inneemt of met speciaal ontworpen testvoertuigen op de weg zelf. De meetaanhangen van ons laboratorium heeft uitgebreide mogelijkheden om de band te testen. Het wiel kan onder gecontroleerde verticale belasting gestuurd en geremd worden terwijl eventueel water voor de band op de weg gespreid kan worden. Krachten en momenten die op het wiel werken worden met de meetnaaf gemeten. De computer bestuurt het gehele meetproces en verwerkt later de meetsignalen tot handzame grafieken en vervolgens tot formules van het gekozen bandmodel.



**Figuur 2:** Bandkarakteristieken berekend met de 'Magic Formula' vergeleken met meetpunten.  
**Figure 2:** Tyre characteristics computed with the 'Magic Formula' compared with test data.

and are modelled successfully by using the original Magic Formula but with the sine replaced by a cosine. The resulting model is simpler and quicker in computation than the earlier version. On the outside back cover of this booklet a 3-dimensional diagram is shown that depicts the variation of the forces as a function of the slip angle and the brake slip. The description of the aligning torque was recently improved and is now modelled (also at combined slip) by using the moment arm, the pneumatic trail, that also appears to vary with slip angle according to a hill shaped function.

Meanwhile, activities around the further development of the model were intensified. Non-steady state transient and oscillatory elements of tyre behaviour have been added and the model has been embedded in a software environment that aims at easy preparation, manipulation and linking of the model with multi-body codes. These developments occur in cooperation with TNO Road Transport, a research organization also located in Delft, and the product name is *Delft-Tyre*. Let us further discuss the physics behind the creation of the horizontal forces and moment which arise through the slipping motion of the wheel relative to the ground. So far, we have dealt with lateral and longitudinal slip. A third slip component appears to exist. That is the spin or rotation slip about the vertical

Een intussen wereldwijd gebruikt model is het empirische zogenaamde 'Magic Formula Tyre Model'. De ontwikkeling begon ongeveer 10 jaar geleden in samenwerking met Volvo in Zweden waar Egbert Bakker sterk bij het onderzoek betrokken was en een groot deel van het werk verrichtte. Het model heeft als basis een formule die opgebouwd is uit een sinusfunctie met een arctangensfunctie als zijn argument. De formule luidt:

$$y = D \sin\{C \arctan\{Bx - E (Bx - \arctan Bx)\}\}$$

De vier parameters  $B$ ,  $C$ ,  $D$  and  $E$  beheersen de grootte en de vorm van de resulterende kromme. De  $y$  is de te berekenen grootte zoals de spoorkracht en de remkracht terwijl de  $x$  de ingangsvariabele is die de bewegingstoestand van het wiel beschrijft zoals de drifthoek en de remslip. Zoals *figuur 2* laat zien kan deze formule een karakteristiek genereren die een frappante overeenkomst met de gemeten relaties toont.

Om het geval van gecombineerde slip te kunnen beschrijven dat optreedt als de auto zich al remmend in een bocht beweegt, wordt het model beduidend ingewikkelder. Michelin heeft hiervoor een belangrijke bijdrage geleverd. Zij gebruiken weegfactoren waarmee de oorspronkelijke zuivere dwars- of langskrachten vermenigvuldigd worden om de situatie van gecombineerde slip te bereiken. Deze weegfactoren hebben een vorm die op een heuvel lijkt. Deze vorm kon met succes door de eerder getoonde Magic Formula gegenereerd worden als de sinusfunctie vervangen wordt door een cosinusfunctie. Het resulterende model is eenvoudiger en sneller dan de oorspronkelijke versie waarbij de gecombineerde slip met behulp van fysisch inzicht was gemodelleerd. De *figuur* op de achterkant geeft een drie-dimensionaal beeld van de verandering van de krachten als functie van de drifthoek en de remslip. De beschrijving van het richtmoment is kort geleden verbeterd en is nu gemodelleerd (ook bij gecombineerde slip) op basis van de momentarm, de zogenaamde pneumatische naloop, die als functie van de drifthoek ook volgens een heuvelvormige kromme varieert.

De activiteiten rond de verdere ontwikkeling van dit empirische bandmodel hebben zich geïntensiveerd. Het niet-stationaire overgangs- en oscillatorische gedrag van de band wordt toegevoegd en professionele software wordt ontwikkeld en op de markt gebracht. Dit gebeurt in samenwerking met TNO Wegtransport en het product heet: *Delft-Tyre*.

axis. This form of wheel slip occurs when the wheel is turned about the vertical axis. At pure turnslip, side slip remains zero and the path of the contact points becomes curved. Spin can be brought about also by tilting the wheel (wheel camber). Then the speed of revolution of the wheel has a component about the vertical axis.

The theory of the creation of the camber force and moment still needs further development. At present Edwin de Vries and Higuchi work on this problem also in connection with a European project that aims at the improvement of the stability of the motor cycle. It is known that it is the camber force that produces a major part of the centripetal force when the motor cycle is cornering.

The spin force is generated through the lateral deformation of the tyre that is developed in the contact range. In undeformed condition, the contact line forms a part of the circular peripheral line. While rolling, the tyre will be deformed in such a way that the contact line coincides with the path of contact points. This path will be straight when the wheel runs straight ahead and it will be curved when the wheel moves in a circle. At camber, the undeformed peripheral line shows a curvature when viewed from above. When running along a straight line, this peripheral line must be deformed laterally to match the then straight shape of the contact line. When the upright wheel enters a curve, the originally straight contact line must change into a curved shape. The above observations hold when the amount of spin is not too large and adhesion (i.e. no sliding) is maintained over a large part of the contact length.

For homogeneous rolling bodies, such as steel railway wheels, the response to both types of spin is identical. For pneumatic car tyres, however, it is expected that a quantitative difference occurs. This is due to the presence of the belt. Its structure is very flexible except in lateral bending. When the loaded tyre is set at a camber angle by tilting the wheel about the longitudinal axis in the road plane, the lower part of the belt will be distorted laterally and in torsion. Due to the rigidity of the belt in out-of-plane bending, however, the peripheral line will remain approximately straight even when road frictional forces are thought to be zero. When the wheel is then started to roll forward (and friction is re-established) only a relatively small lateral deformation (mainly of the tread elements) is required to let the contact line become straight. Therefore, it is expected that for the same magnitude of spin, the force response to path curvature is larger than to camber. Soon, we hope to be able to prove this statement by proper experiments.

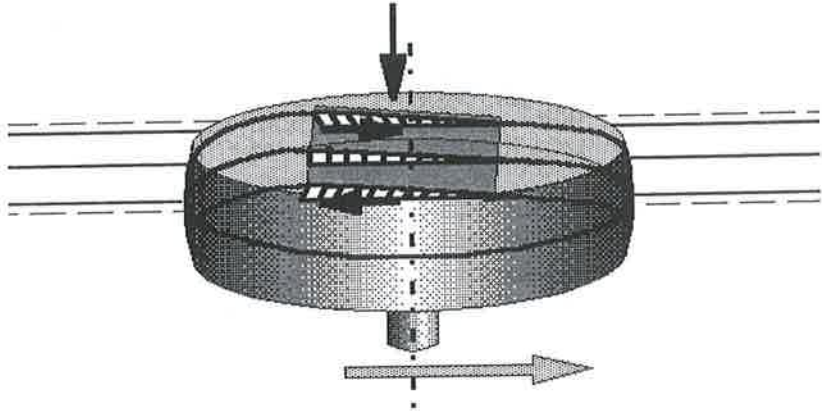
Ik wil nog wat verder ingaan op de fysica van het ontstaan van de horizontale krachten en het moment tengevolge van de slippende beweging van het wiel ten opzichte van het wegdek. We hebben tot nog toe gesproken over het driften of slippen van het wiel in dwars- en in langsrichting. Maar er is nog een derde slip component en dat is de draaislip om de verticale as. Die ontstaat als het wiel gestuurd wordt en de baan die het wiel beschrijft krom is. We kunnen draaislip echter ook krijgen als het wiel niet rechtop staat maar onder een zogenaamde vlucht- of camberhoek voortbeweegt. Dan heeft de omwentelingsnelheid een component loodrecht op het wegdek.

De theorie van het ontstaan van camberkrachten en -momenten is nog niet volledig ontwikkeld. Daar wordt momenteel door Edwin de Vries en Higuchi hard aan gewerkt ook in verband met een Europees project dat zich ten doel stelt de stabiliteit van de motorfiets te verbeteren. En U weet dat een motorfiets in een bocht schuin hangt en er dus camberkrachten ontwikkeld worden. Die blijken het grootste deel van de centripetale versnelling op te wekken.

Het is bekend dat de draaislipkracht ontstaat doordat zich een dwarsvervorming moet gaan ontwikkelen in het contactgebied en wel zodanig dat de contactlijn, die in onvervormde toestand een deel van de omtreksirkel vormt, zich tijdens rollen gaat conformeren aan de baan die de contactpunten volgen over de weg. Zo zal bij camber de contactlijn die in bovenaanzicht oorspronkelijk krom is recht worden terwijl bij het ingaan van een bocht de contactlijn verandert van recht naar krom. Deze bevindingen gelden zolang de draaislip klein blijft en daardoor het glijden zich slechts over een klein deel van het contactgebied voor- doet.

Bij homogene rollende lichamen zoals stalen spoorwegwielen is de responsie op beide vormen van draaislip identiek. Bij autobanden is dat echter in kwantitatief opzicht verschillend. Dat komt door de aanwezigheid van de gordel die elastisch ten opzichte van de velg kan vervormen maar relatief stijf is tegen buigen in dwarsrichting. Daardoor zal de contactlijn al vrijwel recht worden als de schuinstaande band door de verticale belasting aan de onderkant gedeeltelijk wordt platgedrukt. De geproduceerde dwarskracht die nog nodig is om de contactlijn helemaal recht te krijgen (hoofdzakelijk door vervorming van de profielementen) zal dus relatief klein zijn. Het is daarom te verwachten dat bij dezelfde hoeveelheid draaislip de dwarskracht bij camber kleiner is dan bij sturen (baan-kromming). Zeer binnenkort hopen wij in staat te zijn deze bewering met experimenten te staven.

## WHEELS



**Figuur 3:** Dwarsvervorming en torsie bij een band rollend onder een camberhoek.  
**Figure 3:** Lateral and torsional deformation of a tyre running at a camber angle.

This, however, is not the end of the story. There is another mechanism that gives rise to the creation of the lateral spin force. And that is due to the width of the tread band. When spin occurs through turning or camber, the rolling tyre will develop a torque about the vertical axis. This is because of the difference in longitudinal slip that occurs at the left and the right side of the tread band when spin is present. Resulting opposite left and right longitudinal forces form a couple about the vertical axis. This torque deforms the tyre and produces a small steer angle of the belt (Fig. 3). This angle acts as a slip angle and produces the remaining part of the camber or turnslip side force and moment. It is fascinating to fathom the behaviour of the tyre by composing a physical model and then trying to validate the model by means of a series of dedicated experiments. These tests often require specially designed rigs such as the cambering road surface of the flat plank low speed test facility. In this connection I like to mention Peter Roest who was responsible for the design and setting into operation of several of these new unique installations (like the camber oscillation test stand and the relatively high frequency steer oscillation rig). Both are placed over the existing large drum stand, a hydraulic actuator excites the system and

Maar er is nog een tweede mechanisme dat aanleiding geeft tot de vorming van een dwarskracht. Door de breedte van het loopvlak zal bij draaislip de rollende band een moment om de verticale as ontwikkelen. Dit moment doet de band vervormen waardoor de gordel onder een kleine stuurhoek gaat staan (*figuur 3*). Deze hoek werkt als een drifthoek en draagt bij aan de vorming van de camberkracht.

Het is uiterst boeiend om door modelvorming het gedrag van de band proberen te doorgronden en het model te valideren met behulp van uitgekende proefopstellingen, zoals het sledeapparaat dat voorzien werd van een om de langsas kantelbaar wegdek. In dit verband wil ik de naam noemen van Peter Roest die er in is geslaagd een aantal nieuwe unieke installaties te ontwerpen en in bedrijf te stellen, waaronder de wielcamber-oscillatieproefstand en de hoger frequente stuur-oscillatieopstelling. Het onderzoek dat verband houdt met deze trillings-situaties van de band wordt verderop in de lezing belicht.

We weten dat bandmodellen gebruikt worden om het dynamische gedrag van het voertuig te kunnen analyseren ook in de ontwerpfasen. Ze worden dus ingepast in het model van het voertuig. De afgelopen 30 jaar werden steeds hogere eisen gesteld aan de modellen van het complete voertuig. De voorspellingen van het gedrag moesten betrouwbaar en accuraat zijn en de te simuleren omstandigheden waaronder de auto of de motorfiets moest bewegen werden extremer en moeilijker om te modelleren.

Gezien het grote aantal graden van vrijheid van bewegen van het voertuigstelsel met z'n carrosserie, z'n assen en wielen en het stuursysteem met vele verende verbindingen en dan niet te vergeten de mogelijkheid dat er een of wellicht meer aanhangers aan gekoppeld zijn, is het menselijk gesproken al snel niet meer mogelijk om de modellen handmatig op te stellen. Methoden als de vergelijkingen van Lagrange waren en zijn nog steeds zeer nuttig om relatief eenvoudige mechanische systemen te modelleren.

De in de 50-er jaren uitgevonden en later verder ontwikkelde bondgraaftechniek bleek een heel aantrekkelijke methodiek te zijn om eenvoudige maar ook complexe systemen te modelleren. Dat kunnen ook systemen zijn met elektrische en hydraulische componenten. Ook deze deelsystemen kunnen met precies dezelfde gestructureerde systematiek worden beschreven. En dat gebeurt op een grafische manier zonder dat er differentiaalvergelijkingen aan te pas hoeven te komen. Technische systemen kennen allemaal een viertal basiselementen. Dat zijn: de energiebron  $S$ , de capaciteit ofwel de compliantie  $C$ , de inertantie ofwel



with the small measuring hub equipped with piezo-electric sensors the forces and moments are measured. The research connected with this dynamic, oscillatory state of tyre behaviour will be addressed further on in this lecture.

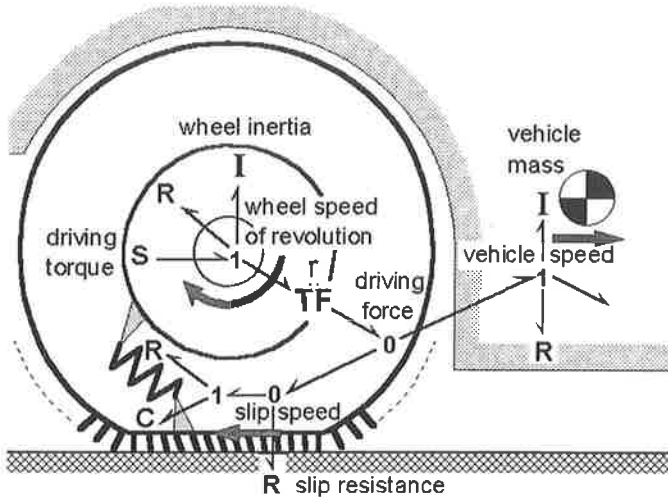
As we have seen before, tyre models are used in connection with the analysis of total vehicle behaviour also in the design phase of the vehicle. During the passed 30 years ever growing demands were made upon the capabilities of vehicle models. Predictions of dynamic properties have to be reliable and accurate, and the conditions of motion to which the car or motor cycle are to be subjected become more complex or extreme and more difficult to model.

In view of the often large number of degrees of freedom the investigator wishes to include in the model of the vehicle system with its body, axles, wheels and steering system with many flexible or partly assumedly rigid connections and not to be forgotten the possible inclusion of one or more trailers, it becomes humanly speaking already rather quickly unfeasible to develop the mathematical model by hand. Methods like the equation of Lagrange were and still are most useful for the derivation of the equations of motion of relatively simple mechanical systems.

The bond graph technique was invented in the fifties and thereafter further developed to an attractive method to model simple but also complex dynamic systems. These may be mechanical systems but also systems with hydraulical and electrical components. The modelling of systems in different energy domains is done in exactly the same structured graphical way without the need to work explicitly with differential equations. All technical systems feature four basic elements. These are: the energy source  $S$ , the capacity or compliance  $C$ , the inertance or inertia  $I$  and the dissipator or resistance  $R$ . All these elements are connected with each other and thus exchange energy. The way in which the energy flows from one element to another is established by means of the bond graph.

Figure 4 shows a part of a simple vehicle model and the corresponding bond graph that only describes the forward motion. The wheel drives the vehicle through the torque that comes from the energy source  $S$ . The graph shows that the rotational motion is transformed into a translational forward motion with speed  $V$ . This is accomplished by the transformer ( $TF$ ) with modulus equal to the wheel radius  $r$ , while the 0 junction takes account for the partly lost speed through mainly the wheel slip speed  $V_s$  relative to the road. The bond graph discloses and shows the physical structure of the system and exhibits in an

de massa traagheid  $I$  en de dissipator ofwel de weerstand  $R$ . Al deze basiselementen wisselen energie uit. De wijze waarop de energiestromen lopen wordt met behulp van de bondgraaf neergelegd.



**Figuur 4:** Deel van een eenvoudig voertuigmodel met bijbehorende bondgraaf  
**Figure 4:** Part of a simple vehicle model with the corresponding bond graph.

In *figuur 4* is een deel van een eenvoudig voertuigmodel getoond met de daarmee overeenkomende bondgraaf, die alleen de vooruitgaande beweging beschrijft. De wielen drijven het voertuig aan met een koppel dat afkomstig is van de bron  $S$ . Een transformator ( $TF$ ) zet de roterende beweging van het wiel via de straal  $r$  om in de langs beweging met snelheid  $V$ . Met het  $0$  knooppunt (waar de aandrijfkracht heerst) wordt rekening gehouden met het gedeeltelijke verlies in snelheid door (hoofdzakelijk) de wielaandrijfslijpsnelheid  $V_s$ . De bondgraaf legt de fysische structuur van het systeem open en toont op elegante wijze verbanden die zelfs voor de ervaren onderzoeker verrassend kunnen zijn. Is de bondgraaf eenmaal ontwikkeld dan is daaruit eventueel direct het complete stelsel vergelijkingen af te lezen, of men kan met behulp van speciale software de computer instrueren en direct overgaan tot het uitvoeren van simulaties en tot eventueel verdere analyse van het systeem.

elegant way relations that may sometimes be surprising, even for the experienced investigator. Once the bond graph has been constructed, it is possible to directly write down the complete set of equations or one may use special software and enter the graph in the computer after which the simulations and further analysis can be performed.

The development of modelling techniques have gone even further. Software codes are now available where the engineer can assemble his model (for instance of a complete vehicle) by simply connecting models of components he collects from a data base. These components like motor, body, links, springs and dampers, and complete wheels with tyre are pre-modelled using either bond graphs or other kinds of mathematical descriptions.

The time required to establish a complex model but also the chance that an error is made is herewith dramatically reduced. Education programs in technical studies will certainly be influenced as a result of these developments. A shift in curriculum items will occur also in non-university studies because the modelling of complex dynamic technical systems has become accessible also for the less specialized students.

An example of such so-called multi-body packages is the program *BAMMS* that stands for: *Bond-graph-based Algorithm for Modelling Multi-body Systems*. At the university, Chris Verheul developed the program and later at TNO extended and refined the software to a fully grown excellent code featuring various analysis and presentation tools. Such packages are nowadays indispensable in the design process of vehicles and other means of transport. Computer animations of the simulated motion help in the judgement of the calculated results. The performance of not yet built vehicles under sometimes exotic conditions can be studied and easily discussed using computer images. Of similar importance is the ability of the program to conduct special types of analysis such as the assessment of natural frequencies, natural modes of vibration, degree of damping or instability and frequency response functions of the linearized system. Of course, it is possible to add user defined additional equations, for example to test a control system of the steering or suspension system.

The stability analysis of motor cycles is an activity that started in our laboratory in the early eighties. Then, Kees Koenen made an important new step by the development of a mathematical model that is suitable for the analysis of the stability also in relatively sharp curves. The model is quite complex including all the important in-plane and out-of-plane mutually interacting degrees of freedom. At

De ontwikkeling is echter nog verder gegaan. Bondgrafen of andersoortige mathematische beschrijvingen van allerlei subsystemen zoals motoren, lichamen, veren, schokbrekers en wielen met banden kunnen apart en van te voren ontwikkeld en in databestanden opgeslagen worden. Later kan de onderzoeker of ontwerper deze bestanden aanroepen en op eenvoudige wijze met elkaar koppelen om zodoende een volledig voertuigmodel op te bouwen. De tijd nodig om een model te ontwikkelen maar ook de kans om fouten te maken is hiermee drastisch teruggebracht. Onderwijstechnisch moet deze ontwikkeling een gedeeltelijke verschuiving van de aandachtsvelden met zich meebrengen, ook bij het niet-universitaire technische onderwijs, omdat het modelleren van complexe technische systemen nu ook bereikbaar wordt voor minder specialistisch opgeleide ingenieurs.

Een voorbeeld van deze zogenaamde multi-body pakketten is het bij ons door Chris Verheul ontwikkelde en vervolgens door hem bij TNO in uitstekend bruikbare vorm gebrachte programma *BAMMS*. Dat staat voor *Bondgraph Algorithm for Modelling Multi-body Systems*. Het is een methodiek die onmisbaar is in het ontwerpproces van voertuigen en transportwerktuigen of van bepaalde componenten die in het systeem moeten functioneren. Computeranimaties van de gesimuleerde beweging helpen bij de beoordeling van de resultaten. Het instabiele gedrag van bijvoorbeeld een auto-caravan combinatie is op het beeldscherm te volgen inclusief het verdere verloop waarbij de complete combinatie kan omrollen. Maar wellicht belangrijker is dat de programma-tuur in staat is om bijzondere analyses uit te voeren zoals het vinden van de eigentrillingsvormen en het bepalen van frequentie-responsiefuncties van het om het bedrijfspunt gelineariseerde systeem. Verder is het natuurlijk mogelijk om als gebruiker extra vergelijkingen toe te voegen om bijvoorbeeld een regelsysteem van het besturings- of wielophangingssysteem uit te testen.

Het stabiliteitsonderzoek van motorfietsen is een reeds in het begin van de jaren 80 aangevangen activiteit. Toen heeft Kees Koenen een belangrijke stap voorwaarts gezet door een model te ontwikkelen dat geschikt is om ook de beweging in relatief scherpe bochten te analyseren. Dat vereiste toentertijd een geweldige en bewonderenswaardige inspanning. Toen werden ook voor het eerst fraaie computer-animatiebeelden gegenereerd van de eigentrillingsvormen waardoor de drie-dimensionale instabiele *weave* en *wobble* oscillaties zichtbaar gemaakt konden worden. Tegenwoordig kunnen door de voortgeschreden techniek met veel minder moeite meer realistische animaties op het scherm worden gebracht.

that time this was a formidable task that compelled admiration. Then, for the first time beautiful animation images were generated of the vibrational modes of the motor cycle. Three-dimensional unstable (cornering) weave and wobble oscillations could be visualized. At present, with the advanced technical tools, more realistic animations can be realized with a lot less effort.

Mathematical models are needed. But, of course, these models are to be correct. Experiments are required to determine the values of parameters and, in less familiar modelling situations, the model size in terms of number of degrees of freedom needs to be assessed. Finally, tests are to be carried out to validate the model for its correctness which may lead to possible adjustments. Complete vehicles: cars, trucks, tractor-trailer combinations, motor cycles but also tanks, straddle carriers and airplanes are tested for these purposes during the execution of special manoeuvres that arise as a response to carefully selected input signals such as variations in steer angle, brake pressure, road unevennesses and artificially generated cross wind velocity patterns. Specialized engineers have taken care of the instrumentation of the vehicle and through sensors the motion can be followed.

In this connection, the interesting work of Peter Ruijs deserves mentioning. Its aim was the validation of the complex model of the motor cycle. To do this with sufficient accuracy, it was needed to get rid of the human rider. The rider exerts forces on the vehicle frame and handle bar which are difficult to control and to measure and which, much more than in a car (except for the steer torque), can influence the resulting motion considerably. Hence, it was decided to develop an unmanned self-stabilizing motor cycle. The so-called 'Rider-Robot' is placed on the frame and applies a torque on the handle bar through an electric motor. The torque is created by feed-back of the measured steer velocity, roll rate and roll angle or an equivalent signal: the lateral acceleration. In this way, complete stabilization of the motion can be achieved. From a pursuing van signals are transmitted radiographically to control coupling, gear box, throttle and brake. Moreover, a steer couple signal is added that corresponds to the roll angle that will arise during the desired cornering motion. It is remarkable that just as the human rider, the rider robot will first slightly steer to the left before a right-hand curve is entered. Obviously, this is a pure stabilization action.

This piece of research is an example of mechatronic design that is not very often encountered a decennium ago at a university. For that, one needs a team of excellent people with an affinity to interdisciplinary work. To our regret, the size

Modellen zijn nodig maar ze moeten natuurlijk ook goed zijn. Er zijn experimenten vereist om parameterwaarden te bepalen en, in meer onbekende situaties, om vast te kunnen stellen hoe omvangrijk het model moet zijn, met name voor wat betreft het aantal graden van vrijheid dat nog meegenomen moet worden. Proeven zijn achteraf ook nodig om het ontwikkelde model te valideren en eventueel aan te passen. Complete voertuigen zoals auto's, vrachtwagens, trekker-opleggercombinaties, motorfietsen maar ook tanks en zelfs vliegtuigen op de landingsbaan worden getest tijdens het uitvoeren van bewegingen die ontstaan als responsie op speciaal geselecteerdeingangssignalen zoals sturen, remmen, wegdek-oneffenheden en kunstmatig gegenereerde dwarswindstoten. Gespecialiseerde meetdeskundigen hebben het voertuig geïnstrumenteerd en door middel van sensoren kan de beweging worden gevolgd.

In dit verband wil ik het interessante door Peter Ruijs uitgevoerde onderzoek noemen dat tot doel had het wiskundige model van de motorfiets te valideren. Om dit zorgvuldig te kunnen doen was het nodig om de invloed van de menselijke berijder uit te schakelen. Die oefent namelijk allerlei moeilijk meetbare krachten en momenten uit op het stuur en het motorfietsframe die (behalve voor wat betreft het stuurkoppel) anders dan bij een auto de resulterende beweging aanzienlijk kunnen beïnvloeden. Er is toen besloten een onbemande zichzelf stabiliserende motorfiets te ontwikkelen. De op het frame geplaatste zogenaamde *Rider Robot* oefent via een electromotor een koppel uit op het stuur. Dit koppel ontstaat door terugkoppeling van stuursnelheid, rolhoek en rolhoeksnelheid. Daardoor kan het oorspronkelijk instabiele voertuig gestabiliseerd worden. Radiografisch worden vanuit een volgauto stuursignalen overgebracht voor het bedienen van de koppeling, de versnellingsbak, de gasklep en de rem en bovendien een stuurkoppelsignaal dat overeenkomt met de rolhoek horend bij de gewenste bochtstraal. Het is opvallend dat deze *Rider Robot* er net als de menselijke bestuurder voor zorgt dat het stuur even naar links wordt gedraaid voordat de motorfiets in een rechter bocht wordt gelegd.

Dit onderzoek mag een staaltje van mechatronisch ontwerpen genoemd worden zoals men dat zo'n 10 jaar geleden niet zo vaak aantrof bij universitaire instituten. Daar heb je een groep uitstekende medewerkers voor nodig die multidisciplinair geïnteresseerd zijn. Helaas is door de voortdurende bezuinigingen en inkrimpingen onze groep sterk geslonken en daardoor minder goed toegerust om dit soort hooggekwalificeerd werk uit te voeren. Toch hebben we recentelijk kans gezien om een ander mechatronisch hoogstandje te verrichten dat geleid

of our group has shrunked drastically because of a constant thrust to cut the budget of the university as a whole and of some parts in particular. Notwithstanding this, we have been successful in conducting another original mechatronic project that led to the *Delft Active Suspension (DAS)* system. It could be done because of the enthusiastic and highly knowledgeable efforts of two Ph.D. candidates: Paul Venhovens and Albert van der Knaap.

The research concerns a unique contribution to the improvement of the dynamic performance of the automobile. While driving, the car exhibits all kinds of undesired parasitic motions. When cornering, the body rolls laterally and when the brake is applied, the body tends to dive. In addition, the body starts to vibrate when the road is uneven. The aim of the project was to reduce undesired body motions by the development of an active suspension system without the drawback of consuming much energy.

Notably during the past decade, much research is done at universities and industrial institutes in actively controlled wheel suspension and steering systems. Much is expected of mechatronics as a new design principle in vehicle technology. The annoying body roll for example, that occurs when a vehicle moves in a curve, can now be suppressed by introducing an anti-roll torque between wheel axle and body. In some applications this is achieved by splitting the roll stabilisor bar in two and winding up the two ends with respect to each other through a hydraulic torsion motor fitted in the middle. Another technical solution was created some years ago by two of our students. One of the mounts of the stabilisor bar is disconnected from the body and an actuator is placed in between. By vertically moving one point with respect to the other, a torque is introduced in the bar. Through the two longitudinal arms at both ends of the bar the torque is converted into the anti-roll couple.

Of course, signals have to be produced to control the actuators. For the suppression of body roll, the lateral acceleration of the car body is measured and the resulting roll couple is calculated by the on-board computer. The force signals that correspond to the opposite anti-roll couple are then sent to the actuators front and rear. It is realized that due to the fact that the roll bar is torsionally flexible, energy is required to perform these actions.

It should be noted, however, that, in principle, no energy is needed to keep the vehicle flat when the motion is changed from straight ahead to cornering. In our laboratory some years ago, a special system was invented that indeed no or only little energy requires to perform the task. And that without obstructing the

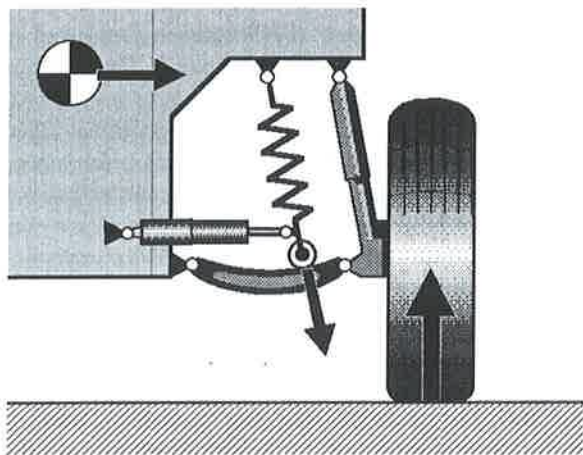
heeft tot het 'Delft Active Suspension' (DAS) systeem. Dat kwam door de inzet van twee enthousiaste en uiterst kundige promovendi, Paul Venhovens en Albert van der Knaap.

Het betreft een bijzondere bijdrage aan de verbetering van het rijgedrag van de auto. Bij het rijden vertoont de auto allerlei ongewenste bewegingen. Als de auto in een bocht rijdt dan rolt de carrosserie zijwaarts en als er geremd wordt dan duikt hij naar voren. Bovendien gaat de carrosserie trillen als we over een oneffen wegdek rijden. De opgave was nu om die hinderlijke bewegingen zoveel mogelijk te onderdrukken zonder dat dat veel energie kost.

Met name gedurende het laatste decennium ziet men bij industriële en universitaire instituten onderzoek gebeuren naar actieve wielophangings- en besturings-systemen. Men verwacht veel van de mechatronica als nieuw ontwerp-principe in de voertuigtechniek. Het hinderlijke overmatig overhellen van de carrosserie in de bocht weet men tegenwoordig wel te onderdrukken door de rolstabilisatorstang te verspannen. Er bestaan meerdere mogelijkheden om dat te bereiken. Een daarvan is het monteren van een hydraulische torsiemotor tussen de twee van elkaar gescheiden helften van de stabilisator-torsiestaaf. Een andere is de in het verleden ook door onze studenten uitgedachte en gebouwde uitvoeringswijze waarbij een van de bevestigingspunten van de torsiestaaf is los gemaakt en met een actuator ten opzichte van de carrosserie verticaal wordt bewogen. Deze actuatoren moeten natuurlijk aangestuurd worden, en dat gaat als volgt. De dwarsversnelling van de carrosserie wordt gemeten en met behulp daarvan worden in de meerrijdende computer de te leveren anti-rolkoppels voor en achter berekend. De overeenkomende signalen worden naar de hydraulische systemen gestuurd en de gewenste koppels worden gegenereerd. In principe is voor deze actie vanwege de flexibiliteit van de torsiestaaf energie nodig.

In ons laboratorium is enige jaren geleden een systeem bedacht waarbij in beginsel geen energie nodig is om het anti-rolkoppel op te brengen. En dat zonder dat de natuurlijke vering wordt belemmerd. Het koppel dat door de veer op de onderste draagarm om zijn draaiingsas wordt uitgeoefend is gelijk aan de veerkracht maal de momentarm. Bij gebruikelijke actieve veersystemen wordt de kracht veranderd. In het Delft Active Suspension systeem wordt de arm veranderd. De werklijn van de veer wordt dus verplaatst zonder dat de veerlengte verandert. Dat kan gerealiseerd worden door een van de uiteinden van de veer te bewegen langs een cirkelboog waarvan het middelpunt samenvalt met het andere einde van de veer (zie *figuur 5*) of, volgens het idee van Van der Knaap





**Figuur 5:** Dwarsvervorming en torsie bij een band rollend onder een camberhoek.

**Figure 5:** Lateral and torsional deformation of a tyre running at a camber angle.

normal springing action of the suspension. The spring force that acts on the lower suspension arm produces a couple around its hinge axis. This couple is equal to the spring force times the distance to the hinge. In usual active systems the force is changed. In the Delft Active Suspension system the moment arm is changed while the force remains constant. The line of action of the force is displaced without changing the length of the spring. This can be brought about by moving one end of the spring along a circle bow the centre of which coincides with the other end of the spring (*Fig. 5*) or, according to the design of Van der Knaap that is based on the cone mechanism, by moving one end of the spring along a circle that lies on a cone surface the tip of which coincides with the other end of the spring. Because of the fact that the spring end moves perpendicularly with respect to the spring force vector, no work is done. The location of the spring end that is not moving may be chosen on the car body or, as an alternative, on the suspension arm.

As a consequence of the low energy consumption, an electric motor can be used as actuator. Recently, tests have been conducted with a car equipped with

dat gebaseerd is op het kegelmechanisme, door het ene einde van de veer te bewegen langs een cirkel die op een kegeloppervlak ligt waarvan de top samenvalt met het andere einde van de veer. De locatie van het niet-bewegende uiteinde kan naar keuze gelegd worden op de carrosserie of op de ophangingsdraagarm.

Vanwege de geringe energiebehoefte kunnen elektromotoren gebruikt worden om de veeruiteinden te verstellen. Recente proeven met een auto waarin het DAS-systeem voor elk van de vier wielen was aangebracht wezen uit dat slechts een gemiddeld vermogen van ca. 600 Watt benodigd was om de auto vlak te houden ook bij heftige stuurbewegingen en hoge dwarsversnellingen. Ook het duiken van de auto bij remmen kan met dit systeem vrijwel volledig onderdrukt worden. Natuurlijk zijn uitgekende regelalgoritmen nodig; inclusief interne rekenmodellen voor het voorspellen van het dynamisch gedrag, om het gewenste resultaat te kunnen bereiken. Alhoewel dit systeem momenteel de beste eigenschappen lijkt te vertonen is een daadwerkelijke realisering in een productieauto niet binnen de komende jaren te verwachten omdat een totale herziening van de wielophangingssystemen noodzakelijk is.

Actieve wielophangingssystemen worden met name ontwikkeld om de verings-eigenschappen te verbeteren. Er zijn dan twee zaken die nagestreefd moeten worden. Ten eerste uiteraard het verbeteren van het trillingscomfort en ten tweede het handhaven van voldoende wegcontact. Dit laatste om veilig stuurgedrag te kunnen waarborgen. In het begin van de ontwikkeling werden hydraulische actuatoren in de wielophanging gemonteerd in de plaats van het oorspronkelijke veer-dempersysteem. Nadelen van deze configuratie zijn het extra vermogen dat nodig is vanwege het dragen van het eigen voertuiggewicht en het feit dat bij hoge frequenties de trillingen ongehinderd door de dan vrijwel starre actuator doorgegeven worden. Dat laatste zal blijven optreden als er een draagveer parallel aan de actuator wordt aangebracht. Slechts door een verend element in serie met de actuator te plaatsen kan het systeem bij hoge frequenties een acceptabel (passief) gedrag vertonen. Actieve systemen worden gekenmerkt door een zekere bandbreedte met een kantelfrequentie waarboven het preciese regelende vermogen sterk vermindert. Door toevoeging van de extra veer zal de bandbreedte een stuk kleiner worden. Dit maakt het actieve systeem langzaam en bovendien zal de veer ingedrukt moeten worden om een kracht te leveren. Dat betekent dus dat er in de bocht weer meer energie nodig is om het voertuig vlak te houden.

the DAS system for each of the four wheel suspensions. It was shown that an average power of only about 600 Watt was needed to keep the vehicle flat also at violent steering input motions and large lateral peak accelerations. Also the pitch rotation that occurs at braking can be suppressed almost completely. Of course, sophisticated control algorithms are needed including internal computation models of vehicle dynamic behaviour to obtain the desired result. Although this system is probably the best in performance and in economic energy consumption, it is not expected that implementation in a production vehicle will be seen in the coming years. This is due to the necessity for a complete re-design of the suspension systems.

Active wheel suspension systems are developed especially to improve the ride vibration isolation properties and thus the vibrational comfort in the vehicle. Two matters are to be considered then. The first is of course the reduction of the vertical body vibrations. The second is the need to maintain sufficient road contact to ensure proper vehicle handling and directional stability properties. In early attempts, hydraulic actuators were mounted instead of the original spring-damper combinations. Disadvantages of this configuration are the extra power needed because of the fact that the vehicle weight is carried by the actuators and the high frequency vibrations that are transmitted almost without attenuation by the then almost rigid actuators. The latter serious drawback will remain when a support spring is added parallel to the actuator. Only by mounting an elastic element in series with the actuator, the high frequency road disturbances can be sufficiently diminished (passively). Active systems are typified by a certain frequency bandwidth. Beyond the corresponding cut-off frequency the control capabilities are gradually diminished. Adding an elastic element will further reduce the bandwidth. It slows down the control activities and, in addition, the generation of a force requires compression or extension of the extra spring which in the case of roll control leads to the consumption of more energy.

Also here, the Delft Active Suspension system shows basic advantages. The adequate bandwidth of more than 10Hz is accompanied by rapid variations of the suspension force (by displacing the spring centre line) without impairing the normal springing action. Moreover, the passive springing action remains secured when the actuator fails. The shock absorber is maintained in this suspension system. An average power of ca. 1000 Watt with peaks of maximum 2500 Watt have been observed to occur for the complete four units system in a car moving over a bad road. These peaks in power can be easily

Ook hier vertoont het DAS- systeem voordelen. Een voldoende bandbreedte ( $> 10$  Hz) gaat gepaard met een snelle krachtverandering (door verplaatsing van de werklijn) terwijl de normale veerwerking onaangetast blijft. Bovendien blijft bij uitvallen van het actuatordeel de veerwerking gewaarborgd. De schokbreker blijft bij dit systeem gehandhaafd. Een gemiddeld vermogen van omstreeks 1000 Watt met piekvermogens van 2500 Watt voor het complete systeem werd op slechte wegdekken gemeten. Deze piekbelastingen kunnen door het gebruik van electromotoren gemakkelijk opgewekt worden. Anders dan bij hydraulische actuatoren, worden deze motoren ontworpen op het te verwachten gemiddelde vermogen. In een zeer recent ontwerp worden condensatoren gebruikt voor het leveren van de piekvermogens.

Simulaties met de computer en later met proeven op de weg hebben aangetoond dat het DAS-systeem in staat is om de bekende resonantiepiek, die optreedt tussen 1 en 2 Hz in de verticale trillingsresponsie op wegdekoneffenheden, volkomen te onderdrukken. Dit levert een aanzienlijke verbetering op in het trillingscomfort. Het achterliggende regelalgoritme maakt gebruik van het alom geaccepteerde zogenaamde *sky-hook* principe. De actuator wordt dan zodanig aangestuurd dat een kracht wordt opgewekt die gelijk is aan de kracht die in een denkbeeldige schokbreker zou werken als die gemonteerd zou zijn tussen de carrosserie en de hemel. Omdat deze kracht door de echte actuator niet alleen op de wagenbak wordt uitgeoefend maar ook op de wielas, kan het gebeuren dat een versterking van de wielast-veranderingen gaat ontstaan in de buurt van de asresonantiefrequentie. In de bocht kan dat aanleiding geven tot te sterk zijdelings driften van de band. De koersvastheid wordt daardoor verslechterd.

Actieve systemen hebben een belangrijk extra voordeel boven de conventionele passieve systemen. Dat is de mogelijkheid om de regeling aan te passen aan de omstandigheden. Bij sturen maar ook bij remmen kan de eerste prioriteit gelegd worden bij het handhaven van voldoende wegcontact. Dat wordt bereikt door terug te schakelen naar een conventionele maar relatief harde demperwerking tussen bak en as. Ook kan het adaptief regelen ten behoeve van een beter trillingscomfort met voordeel toegepast worden door in afhankelijkheid van de mate van oneffenheid van het wegdek een aangepaste demping en veerstijfheid te kiezen en wel zodanig dat zoveel mogelijk van de volledig beschikbare veerweg gebruik gemaakt wordt. We kunnen in dit verband ook nog opmerken dat bij systemen waarbij het rollen (en het dompen) onderdrukt wordt, de volledige

provided by the electric motors which (different from hydraulic actuators) are laid out for the average expected power. In a very recent design, electric capacitors are used to supply the peaks in power.

Computer simulations and subsequently experiments in the laboratory on a shaker test facility and on the actual road have shown that the DAS system is capable of completely suppressing the first body resonance peak that usually appears in between 1 and 2Hz of the vertical vibration response to road unevennesses. Obviously, this improves ride comfort considerably. The algorithm that controls the actuators is based on the well-known *sky-hook* principle. The force generated by the actuator is made equal to the force supplied by an imaginary viscous damper mounted between the body and the sky. Because of the fact that in reality the actuator force is also applied to the axle mass, an increase in amplitude of the wheel load will occur near the axle resonance frequency. This will have an adverse effect on the average cornering stiffness of the tyre.

Active systems offer an additional important feature and that is the ability to adapt the control strategy to possibly changing conditions. When steering or braking actions are needed, first priority is given to active safety which means minimizing wheel load variations. A simple approximate way is switching to a normal but relatively stiff damper function between body and axle. Moreover, adaptive control can be effectively applied for the sake of improving comfort by adapting the damping and the stiffness to the degree of road roughness in a way that the suspension travel space is maximally used. In this connection it may be remarked that with systems that suppress roll and pitch, the complete wheel travel space remains available. As a consequence, the spring stiffness can be chosen lower and the roll stabilizer bar can be omitted. Of course, a slow level control system to counteract the effect of changes in static load becomes then indispensable.

During the past few years, four-wheel-steer has been a subject of intensive research world-wide. The objective is to significantly improve steerability and stability also against side wind gusts. At TNO-Road Transport successful work has been done on this theme in recent years with help of our students. Due to high costs of development and implementation and problems connected with fail safe requirements, the commercial introduction of the four-wheel-steer control principle is retarded seriously. Another approach to improve vehicle dynamic behaviour has a better chance for the immediate future. That is based on the control of the longitudinal wheel forces instead of the lateral forces. By

veerweg beschikbaar blijft bij sturen en remmen. Daardoor kunnen lagere veerstijfheden gekozen worden en kan van een rolstabilisator afgezien worden. Dit is gunstig voor het comfort. Een hoogteregeling is dan onontbeerlijk.

Vier-wiel-besturing is de afgelopen jaren een intensief onderzocht onderwerp geweest met het doel om de bestuurbaarheid en de koersstabiliteit (ook bij dwarswindvlagen) significant te kunnen verbeteren. Bij TNO-Wegtransport is daar met medewerking van onze studenten de afgelopen jaren met succes aan gewerkt. Bij lage snelheid worden de voor- en achterwielen tegengesteld gestuurd waardoor de achterwielen direct meedoen aan het ontwikkelen van een baankromming en waardoor de te bereiken bochtstraal kleiner wordt. Bij hogere rijsnelheden wordt dezelfde kant opgestuurd om een beter gebalanceerde dwarsversnelling van begin af aan te kunnen genereren. Minder stuurbewegingen zijn nodig en sterk driften of uitbreken van de achteras wordt tegengegaan. Helaas wordt de doorvoering van deze interessante systemen sterk afgeremd door de hoge kostprijs, het extra gewicht maar vooral door de omvangrijke voorzieningen die men moet treffen om voldoende betrouwbaarheid te kunnen verzekeren.

Een ander nieuw systeem maakt meer kans om in de onmiddellijke toekomst uitgebracht te worden. Dat is de onlangs in de industrie ontwikkelde zogenaamde voertuig-dynamica-regeling. Alleen de voorwielen worden gestuurd. Extra giermomenten kunnen bij dit systeem geleverd worden door links en/of rechts (tegengesteld aan elkaar gerichte) langskrachten te genereren. Reeds beschikbare rem- en aandrijfslipregelingen kunnen gebruikt worden om de wielslip zodanig in te stellen dat de gewenste rem- of aandrijfkraft door elk individueel wiel opgewekt wordt. Als voorbeeld kan dienen een plotselinge uitwijkmanoeuvre. Eerst wordt naar links gestuurd en vervolgens naar rechts. Een in de laatste fase mogelijk uitbreken van de achteras wordt voorkomen door gedoseerd het linker voorwiel af te remmen.

Als we de horizontale beweging van de auto goed willen regelen dus door bijvoorbeeld extra stuuracties dan moeten we eigenlijk zo goed mogelijk weten hoe het met de stroefheid tussen band en wegdek gesteld is. De geschatte momentaan geldende bandkarakteristieken moeten steeds opnieuw in het interne wetenschappelijke model van de auto ingevoerd worden om zo goed mogelijk de respons op regelacties te kunnen voorspellen. In ons laboratorium onderzoekt Wim Pasterkamp de mogelijkheden voor een nieuwe aanpak waarbij niet de voor de hand liggende relatie tussen spoorkracht en de (moeilijk te meten) drifthoek van

employing already available brake and traction control systems, yaw moments can be generated that, when properly applied in limit maneuvering conditions, may result in an increased margin of stability and directional control. A sudden obstacle avoidance manoeuvre may serve as an illustration. First, the car steers to the left and subsequently to the right. A possible rear axle break out that may occur in the last phase of the manoeuvre can be avoided by a proper brake application of the front left wheel.

For a good control of the horizontal motion of an automobile through for instance additional active steering actions, a reasonable estimate of the road/tyre frictional condition is a necessity. The estimated tyre characteristics are to be used in the internal vehicle model with which the response to control actions is predicted. The estimation of the friction level is a difficult problem. A new original approach is being investigated in our laboratory by Wim Pasterkamp. Not the rather obvious relationship between side force and the not easily measurable slip angle is used but the relation between side force and aligning torque. These quantities can be derived together with the also needed vertical wheel load from a limited number of forces to be measured in the suspension and steering system. This is an example of an investigation where from the outset we felt rather uncertain if the objective could ever be reached. The original idea is certainly sound. But the detailed elaboration caused a lot of mind-bending. The method of neural networks has now been adopted to model in practice the essential part of the vehicle and to estimate the actual tyre characteristics. Recent results are quite promising. A self-learning process is yet to be implemented to account for slowly varying parameters due to e.g. tyre wear and drop in inflation pressure.

Ladies and Gentlemen,

We have returned now to the pneumatic tyre and we have seen that its properties are crucial for the horizontal dynamic behaviour of the vehicle. However, there is more to worry about. The tyre itself is a dynamic medium. A more detailed model of the tyre is needed if we wish to study the effect of road unevennesses on body vibrations, on the effectiveness of brake control systems and on the reduction in cornering capacity and if we want to know more about the origination of the self-excited violent wheel shimmy oscillations.

The transient property of the tyre is well illustrated by considering the response to a suddenly imposed slip angle. The side force immediately starts to grow and

het wiel gebruikt wordt maar de relatie tussen spoorkracht en richtmoment. Deze grootheden kunnen samen met de ook nodige verticale wielbelasting afgeleid worden uit een beperkt aantal in de wielophanging en het stuursysteem te meten krachten. Dit is een voorbeeld van een onderzoek waarbij we van te voren onzeker waren of het wel zou lukken. Het oorspronkelijke idee lijkt zeker gezond maar de manier van uitwerken bezorgde heel wat hoofdbreken. De nu toegepaste methode van het neurale netwerk lijkt uitkomst te bieden om in de praktijk het essentiële deel van de auto te modelleren en de bandkarakteristiek te kunnen schatten. Een zelf-leerproces dient dan nog te worden geïmplementeerd om langzaam veranderende bandeigenschappen door bijvoorbeeld bandslijtage en afnemen van de bandenspanning te kunnen verwerken.

Dames en Heren,

we zijn weer terug bij de autoband en we hebben gezien dat zijn eigenschappen bepalend zijn voor het horizontale bewegingsgedrag van het voertuig. Maar er is meer aan de hand. De band zelf is een dynamisch medium. En als we het effect van wegdekoneffenheden op trillingen, op de werking van anti-blokkeersystemen en op de reductie van de gemiddelde spoorkracht willen onderzoeken en als we meer willen weten over het ontstaan van zichzelf opwekkende trillingen zoals de beruchte wielshimmy, dan is het nodig het bandmodel verder te ontwikkelen.

Dat er inderdaad een overgangverschijnsel optreedt wordt duidelijk als het wiel onderworpen wordt aan een plotseling opgelegde drifthoek. De dwarskracht zal dan van nul af aangroeien en vervolgens een asymptotische waarde gaan naderen. Deze gemeten responsie lijkt sterk op het gedrag van een eerste-orde-systeem, althans als we de test uitvoeren bij zeer lage rijsnelheid. Het verschijnsel kan fysisch verklaard worden als we beseffen dat de band pas een kracht kan leveren als het karkas zijdelings vervormd is. Het eenvoudigste theoretische model dat dit gedrag kan beschrijven is het reeds in de veertiger jaren ontwikkelde gespannen snaarmodel.

Dit model vormt de grondslag van vele meer uitgebreide niet-stationaire bandmodellen. *Figuur 6* toont een bovenaanzicht van het zijdelings vervormde basismodel. Een eerste-orde differentiaalvergelijking beschrijft de verandering van de dwarsvervorming  $v_1$  van de snaar aan de voorkant van de contactlijn als responsie op de dwarsbewegingen van het wiel uitgedrukt in termen van de drifthoek  $\alpha$  en de draaislip  $\phi$ . Naast de rijsnelheid  $V$  is een belangrijke parameter van dit

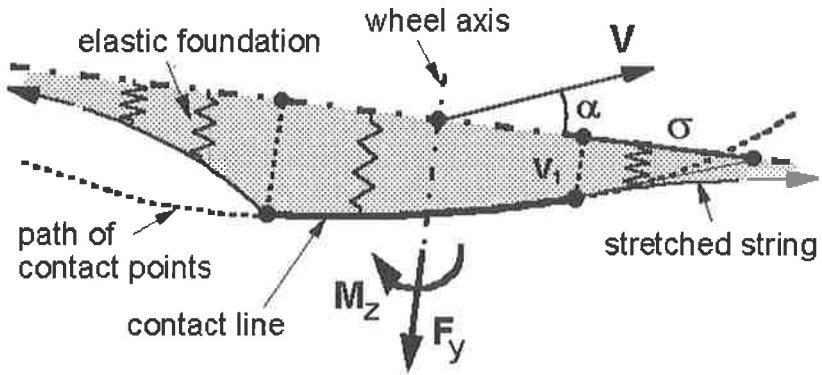


then gradually levels off while approaching an asymptotic value, that is the steady-state value of the tyre side force. This measured response is similar to a first-order step response function. This is true at least when the test is carried out at very low speed of travel. The observed behaviour can be explained when it is realized that a side force can only be generated if the carcass is laterally deformed. The most simple physical model that is capable of an adequate description of the non-steady behaviour is the well-known stretched string model. This model forms the basis of many more elaborate non-steady-state tyre models. *Figure 6* shows a top view of the laterally deformed string model. The following first-order differential equation describes the change of the lateral deformation  $v_1$  of the string at the leading edge of the contact line as a response to the lateral motions of the wheel plane expressed in terms of the slip angle  $\alpha$  and the turnslip  $\phi$ .

$$\frac{1}{V} \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_1}{\sigma} = \tan \alpha - a \phi$$

Besides the wheel speed of travel  $V$  we have another important parameter of the model and that is the so-called relaxation length  $\sigma$ , a kind of time constant but then with the dimension of the travelled distance. The symbol  $a$  denotes half the contact length.

The equation plays an essential role in the simulation and the explanation of the nature of the violent self-excited shimmy oscillations that under certain conditions show up with e.g. the front wheels of light trucks, motor cycles and the landing gears of aircraft. We are dealing with a peculiar mechanism that transforms the forward motion energy into lateral and steering oscillations of the wheels. The aligning torque that as a result of the first-order differential equation shows a phase lag with respect to the steering motion of the wheel is one of the important elements causing self-excitation. Igo Besselink is actively engaged in the development of a sufficiently complete, experimentally validated mathematical model of the mechanical construction of the landing gear including the dynamic interaction with vibrational modes of the body and wings of the airplane. The objective is to have a reliable design tool to keep future generations of landing gear structures free of shimmy. Also, it is desired to get better insight into the nature of some particular modes of shimmy. Sometimes relatively small modifi-



**Figuur 6:** Gespannen snaarmodel gebruikt voor de analyse van niet-stationaire dwarsbewegingen.  
**Figure 6:** Deformed stretched string model for transient lateral motion analysis.

model de relaxatielengte  $\sigma$ , een soort tijdconstante maar dan met de dimensie van de afgelegde weg. De halve contactlengte wordt aangeduid met  $a$ .

$$\frac{1}{V} \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_1}{\sigma} = \tan \alpha - a \phi$$

De vergelijking speelt een essentiële rol in de simulatie en in de verklaring van het ontstaan van de heftige instabiele en zichzelf in standhoudende shimmy-oscillaties die kunnen optreden bij de voorwielen van lichte vrachtwagens, bij motorfietsen en bij de landingsgestellen van vliegtuigen. Er is sprake van een bijzonder mechanisme dat de voortbewegingsenergie van het voertuig weet om te zetten in dwars- en stuuroscillaties van de wielen. Het richtmoment dat vanwege de eerste-orde vergelijking een fase-achterstand vertoont ten opzichte van de sturende beweging van het wiel blijkt een van de belangrijke achterliggende oorzaken van het shimmyverschijnsel te zijn. Igo Besselink is bezig met de ontwikkeling van een voldoende compleet en experimenteel gevalideerd model van de mechanische constructie van het landingsgestel inclusief de dynamische interactie met trillingsvormen van de vliegtuigromp en de vleugels. Het doel is een betrouwbaar ontwerpinstrument te verkrijgen waarmee volgende generaties

cations in certain stiffnesses and dimensions may become responsible for subtle changes in the pattern of the motion that may give rise to the occurrence of a certain type of unstable shimmy mode. Also the way in which the landing is initiated appears to be of great importance for the possible development of shimmy. Wheel shimmy is a tenacious phenomenon that kept me occupied during the whole of my career. With modern modelling, computational and analysis methods we are confident that, at last, this problem will be conquered definitely.

Oscillatory motions such as those discussed above show frequencies that usually lie in between 5 and 15 Hz. Phenomena like these but in particular also those where higher frequencies are dominant demand ever increasing refinements of the tyre model. It is because of this, that we are presently occupied with a comprehensive project that is supported by an international industrial consortium. The objective of the project is to develop a pragmatic tyre model that is well suited for the performance of vehicle simulations also under extreme manoeuvring conditions. These conditions may range from starting to roll from stand-still to running at high speed, at small and large slip, over also short wavelength (>20 cm) road unevennesses and at frequencies that may go as high as 50 Hz. The project name is *SWIFT* that stands for: *Short Wavelength Intermediate Frequency Tyre model*.

In an earlier phase, Takahashi has conducted important work concerning the diminished cornering capacity of a tyre rolling over an undulated road surface causing the wheel load to vary with time. This study is based on the earlier mentioned first-order differential equation. Because of the simplicity of that model, the frequency still had to be kept low while the wavelength of the undulations had to remain relatively large. Later, Gong and subsequently Kim did a fundamental investigation into the rolling of a tyre under dynamic conditions where in the model the in-plane deformation of the belt is composed of a possibly large number of modal components of vibrations.

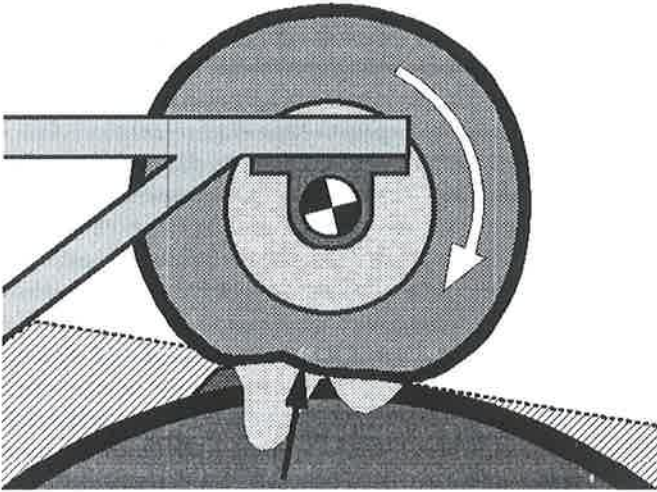
Peter Zegelaar and Jan Pieter Maurice are directly involved in the *SWIFT* project. TNO is responsible for the project management and the professional software development. Besides the extensive theoretical work, this research requires a number of test series notably on the laboratory's 2.5m drum test stand. Again, ingenious specially designed experimental facilities are utilized. High frequency variations of steer and camber angle, axle height, brake torque and the possibility to roll over several shapes of unevennesses have been provided for.

landingsgestellen shimmyvrij gehouden kunnen worden. Bovendien willen we een beter inzicht krijgen in het wezen van enige bijzondere vormen van wielshimmy. Sommige relatief kleine wijzigingen in stijfheden en geometrie kunnen verantwoordelijk zijn voor subtiele veranderingen in het bewegingspatroon waardoor een bepaalde instabiele trillingsvorm kans krijgt te ontstaan. Ook de wijze waarop de landing wordt ingezet blijkt van belang te zijn bij gevoelige systemen. Wielshimmy is een hardnekkig verschijnsel dat mij gedurende mijn hele wetenschappelijke carrière heeft beziggehouden en dat nog steeds bij gelegenheid z'n kop weet op te steken maar nu toch kans maakt om definitief bestreden te kunnen worden door inzet van moderne berekenings- en analysemethoden.

We hebben het hier over trillingen met een frequentie die kan liggen tussen ca. 5 en 15 Hz. Verschijnselen als deze maar in het bijzonder ook die waarbij ook hogere frequenties van belang zijn zoals bij rijden over oneffenheden en de effecten daarvan op bijvoorbeeld de remregeling, die vragen om steeds verder gaande verfijningen van het bandmodel. Het is om deze reden dat we momenteel bezig zijn met de uitvoering van een groot project dat ondersteund wordt door een internationaal industrie-consortium. Het project stelt zich ten doel een pragmatisch model te ontwikkelen dat geschikt is voor voertuigsimulaties onder sterk uiteenlopende omstandigheden. Deze condities variëren van rollen vanuit stilstand tot rijden met hoge snelheid, bij kleine en grote slip, over korte wegdekoneffenheden en bij frequenties die kunnen oplopen tot omstreeks 50 Hz. De projectnaam is *SWIFT* dat staat voor *Short Wavelength Intermediate Frequency Tyre model*.

Takahashi heeft in een eerdere fase belangrijk werk verricht voor wat betreft het verminderen van de spoorstijfheid bij het sturen in een bocht over oneffen wegdek waarbij de frequenties nog beperkt gehouden moesten worden. Gong en Kim hebben een diepgaand fundamenteel onderzoek verricht naar het rollen van de band onder dynamische condities waarbij de modelvorming gedacht is te zijn opgebouwd uit een (eventueel groot) aantal modale trillingsvormen van de gordel.

Peter Zegelaar en Jan Pieter Maurice zijn direct betrokken bij het *SWIFT* project waarvan TNO het projectmanagement voert en de professionele software ontwikkelt. Naast het uitgebreide theoretische werk is het voor dit onderzoek noodzakelijk om een aantal series experimenten uit te voeren op de grote roltrommel van het laboratorium weer gebruikmakend van speciaal ontworpen ingenieuze opstellingen. Er is voorzien in relatief hoogfrequente variaties van stuur- en



**Figuur 7:** Band rollend over een korte drempel met equivalent wegvlak voor het symmetrische band-model.

**Figure 7:** Tyre rolling over a short cleat with equivalent road input for the in-plane tyre model.

A great deal of creativity proved to be necessary to tackle sometimes seemingly unsurmountable problems and to transform these into well manageable pragmatic solutions. Consider as an example the tyre rolling over short cleats. This constitutes a theoretically heavy problem that might be solved using the modal approach of Gong. However, the required computer time is far too long for the simulation model we envision. The problem has been approached in a partly empirical way. In an experiment, the tyre is rolled over a cleat at very low speed (to be sure that no dynamic effects occur) and at constant axle height. During this process, the vertical and longitudinal forces acting on the wheel axle are measured and the wheel and drum angular velocities are recorded. From the measured responses, effective inputs can be derived. These are the continuously varying vertical displacement and forward slope of an assumedly plane equivalent road surface (Fig. 7) and the variation of the effective rolling radius (obtained from the variation in angular wheel speed). Henceforth, these effective quantities are used as inputs in a relatively simple dynamic tyre model that

---

camberhoek, ashoogte en remmoment en de mogelijkheid om over oneffenheden te rollen. Veel creativiteit is nodig om soms onoverkomelijk lijkende problemen op te lossen en om te zetten in goed hanteerbare pragmatische benaderingen. Denk maar eens aan het rollen over korte drempels. Dat is een theoretisch zwaar probleem dat eventueel is op te lossen met het modaal opgebouwde model van Gong. Maar de ermee gemoeide rekentijd is aanzienlijk en veel te lang voor het voor ogen staande simulatiemodel. Het probleem is aangepakt door een gedeeltelijk empirische benadering te kiezen. De band wordt uiterst langzaam met constante ashoogte over de drempel gerold en intussen worden de krachten werkend op de wielas en de wielomwentelingssnelheid gemeten. Uit deze responsies kunnen effectieve ingangen worden berekend die overeenkomen met de variërende verticale verplaatsing en helling van een equivalent vlak wegdek (*figuur 7*). Bovendien wordt de equivalente verandering van de effectieve rolstraal bepaald die veranderingen in de gemeten omwentelingssnelheid voor z'n rekening neemt. Deze effectieve ingangen worden vervolgens in een wat dit aspect betreft relatief simpel bandmodel toegepast. Zegelaar weet deze effectieve ingangen trouwens o.a. door berekeningen met het modale model goed te benaderen en dat is belangrijk voor latere toepassingen, want dan zijn die speciale proeven wellicht niet meer nodig.

Dames en Heren,

Dit bandenonderzoek heeft een onuitwisbaar stempel gezet op de Delftse voertuigdynamica activiteiten. Ik zeg Delftse omdat ik daar ook TNO bij wil betrekken. De afdeling Voertuigdynamica van TNO-Wegtransport, geleid door Dr. J. Pauwelussen vormt met onze sectie Voertuigtechniek een succesvol samenwerkingsverband dat internationaal onder de naam *Delft Vehicle dynamics Research (DVR)* opereert. Grote vaak internationale projecten en meer routinematig onderzoek worden gezamenlijk uitgevoerd waarbij wetenschappelijke, technische en managementkennis elkaar uitstekend aanvullen en de vaak unieke faciliteiten van ons laboratorium een waardevolle extra dimensie aan het onderzoek geven.

Maar dat geven ze ook aan het onderwijs. Want let wel, er wordt weleens gesuggereerd dat in een faculteit als de onze meer aan modelmatig onderzoek gedaan zou moeten worden omdat het handhaven van laboratoria duur is, maar de praktijk neemt ons onderzoek niet serieus als het modelmatig werk niet op degelijk experimenteel onderzoek gebaseerd is en in z'n totaliteit niet door

features the first in-plane and out-of-plane vibrational modes, residual stiffnesses and combined distributed slip properties based on the Magic Formula empirical slip model. To avoid the execution of many repeated tests for the assessment of the effective inputs, Zegelaar has developed approximate theoretical methods, one of which is based on the modal model.

Ladies and Gentlemen,

This research in tyre performance certainly has left a stamp on the Delft vehicle dynamics research and teaching activities. I am saying Delft because I also want to recognize the work conducted by TNO-Road Transport in this respect. Its department of Vehicle Dynamics with its head Dr. J. Pauwelussen forms with our laboratory a joint venture that operates internationally under the name *Delft Vehicle-dynamics Research (DVR)*. Large, often international projects but also routinework are carried out in collaboration, where scientific, technical and management expertise complement each other. The often unique experimental facilities of our laboratory provide a valuable extra dimension.

This extra dimension, however, is also given in connection with the education in engineering. Although it has been suggested that in a faculty like ours more effort should be given to the use of models in research activities because laboratories are said to be too expensive to maintain, it is to be realized that in practice research outcome will not be taken seriously if model work is not based on proper experimental studies and not validated by means of adequate tests. It is an attitude the importance of which should be made clear to the students. The education in the relevant skills should not be neglected and ought to be performed preferably in an environment where professional experimental research commonly occurs.

In this connection, it is to be regretted that an initiative to bundle knowledge, experience and facilities in a Dynamics Laboratory to be established inside our faculty hasn't been honoured, despite the fact that the dynamics-oriented groups of the faculty gladly supported the initiative in this time of economy measures, abandoning of facilities and enforced moves.

However, this doesn't alter the fact that we are glad that the test facilities most important for the research in vehicle system dynamics will be spared and will be newly installed in a proper albeit more restricted space. This provides the possibility to continue in the future the internationally highly valued research and education also through the esteemed support of TNO.

---

middel van proeven gevalideerd kan worden. En dat is een attitude die aan studenten en promovendi meegegeven dient te worden. Het bijbrengen van de noodzakelijke vaardigheden behoort een essentieel niet te verwaarlozen onderdeel van de opleiding te zijn en dan het liefst in een inspirerende omgeving waar levend onderzoek verricht wordt.

In dit verband is het te betreuren dat een initiatief tot bundeling van kennis, ervaring en faciliteiten binnen een op te zetten dynamica-laboratorium binnen onze faculteit niet is gehonoreerd ondanks het feit dat dynamica-georiënteerde groepen van onze faculteit het initiatief in deze tijd van bezuinigen en verhuizen van ganser harte ondersteunden.

Dit neemt niet weg dat we blij zijn met de toezegging dat de essentiële proefstanden van ons laboratorium behouden zullen blijven ook nu de verhuizing van onze kapitale experimentele faciliteiten onontkoombaar is gebleken. Daardoor zal het internationaal hooggewaardeerde onderzoek en onderwijs voortgezet kunnen worden mede door de gewaardeerde ondersteuning van TNO.

Ik denk dat ons onderwijs en onderzoek succes hebben gehad omdat wij, net zoals dat ook op andere plaatsen in onze faculteit gebeurt, gedegen theoretisch onderzoek koppelen aan het experiment. Uit de betreffende analyse komt uiteindelijk het ontwerp en de constructie voort. Je moet dus heel wat weten voordat je met verstand een ontwerp van een systeem kunt maken. En dat beseft moet natuurlijk de grondslag blijven vormen van het universitair ontwerponderwijs!

Ons motto zou dan ook moeten luiden: *'DESIGN THROUGH ANALYSIS'*.

Ik heb al een aantal namen van onderzoekers genoemd die in hun promotiestudie gedurende mijn hoogleraarschap inhoud en uitbreiding hebben gegeven aan een structuur van kennis die voortgesproten is uit ideeën die vanuit verschillende bronnen vaak schijnbaar toevallig ontstonden. Ik ben hen daar zeer dankbaar voor. Het begeleiden van promovendi, gastonderzoekers en studenten is voor mij altijd een boeiende en stimulerende bezigheid geweest en ik denk dat ik daar de komende jaren nog actief bij betrokken zal blijven.

Nog niet genoemd heb ik mijn medewerker Dr. Savkoor. Hij is al jaren erkend als de autoriteit op het gebied van wrijving van rollende lichamen en intussen heeft hij z'n sporen verdiend op het gebied van de voertuigdynamica en de voertuigtechniek in het algemeen. Wij mogen hopen dat zijn nu veel te zware taak



I have already mentioned the names of researchers who in their Ph.D. studies during my functioning as professor have given substance and extension to a structure of knowledge that partly arose from ideas which (from different sources) often came into being seemingly by accident. For this I am most grateful. Guidance of students, Ph.D. students and guest researchers has always been an absorbing and stimulating activity and I am sure that for the coming years I will remain actively involved.

I did not have the chance yet to mention my associate Dr. Savkoor. Already for many years he is recognized as the authority in the field of friction of rolling bodies and more recently he has won his spurs in the area of vehicle dynamics and in vehicle technology in general. We are hopeful that his momentarily too heavy task will be relieved through expansion of the staff. I am grateful to Arvin Savkoor and with him to my earlier retired associate Dushan Ryba for their friendship and for their devoted and expert contribution to the task we were charged with. It goes without saying that my appreciation also extends to the other members of the staff. I cannot mention all by name but I want to make an exception for Jan 't Hart, Jan Rooney and my former assistant Piet Jillesma. Their knowledgeable and dedicated involvement in the education of students and in the realization of research activities has been of invaluable importance.

In our teaching activities, not only attention is paid to the subject of road vehicles, but also to railway vehicle technology. For our students this constitutes an important broadening of their knowledge horizon. I wish to mention here with gratitude our part-time professor Keizer and his predecessor professor Zeevenhooven who have successfully shaped the education in railway vehicle engineering with admirable efforts in their very limited time in collaboration with their associate Wiersma.

Of course, students are of greatest importance for a university. Students, however, are also interesting and pleasant to get along with. During my career at the university I have always devoted myself with much pleasure to pass on knowledge and to supervise students in their research project. Naturally, guidance of students is also being taken care of by the staff and Ph.D. students. But in addition and for a growing portion also by research and development organizations outside the university. Of these, I mention TNO and the Dutch industry, notably DAF, NedCar and Fokker but also industries abroad, in particular: Volvo, Ford, Goodyear, BMW, Renault and Harley-Davidson and the Japanese companies Bridgestone, Toyota, Nissan and Mitsubishi. Getting actively

spoedig verlicht kan worden door uitbreiding van de staf. Ik wil Arvin Savkoor en met hem onze oud-medewerker Dushan Ryba van harte bedanken voor hun vriendschap en hun zeer kundige en toegewijde bijdrage in de uitvoering van de aan ons gestelde taak. Vanzelfsprekend geldt mijn dank ook voor de overige medewerkers. Ik kan hen niet allen bij name noemen maar ik wil een uitzondering maken voor Jan 't Hart, Jan Rooney en mijn oud-medewerker Piet Jillesma. Hun deskundige ondersteuning in het onderwijs en het onderzoek zoals zich dat over de jaren heeft ontwikkeld is van onschatbare betekenis geweest.

In ons onderwijs wordt niet alleen aandacht geschonken aan wegvoertuigen maar ook aan railvoertuigen. Voor de studenten betekent dit een belangrijke verbreding van hun kennisveld. De deeltijd-hoogleraar Keizer en zijn voorganger Zeevenhooven wil ik hier met dankbaarheid noemen omdat zij samen met de aan hen toegevoegde medewerker Wiersma op geslaagde wijze met veel inzet in de slechts schaarse tijd die zij hiervoor vrij konden maken, vorm hebben gegeven aan dit onderwijs.

Studenten zijn natuurlijk het allerbelangrijkst voor een universiteit. Maar studenten zijn ook heel interessant en plezierig om mee om te gaan. Ik heb mij gedurende mijn loopbaan aan de universiteit altijd met veel genoegen ingezet voor het overdragen van kennis en voor de begeleiding van de studenten bij hun afstuderen. De begeleiding wordt natuurlijk medeverzorgd door medewerkers en promovendi. Maar ook in steeds toenemende mate door onderzoeks- en ontwikkelingsgroepen buiten de TU. En dan denk ik aan TNO en het Nederlandse bedrijfsleven, waarvan ik wil noemen DAF, NedCar en Fokker, maar ook buitenlandse bedrijven zoals in het bijzonder Volvo, Ford, Goodyear, BMW, Renault en Harley-Davidson en de Japanse industrieën Bridgestone, Toyota, Nissan en Mitsubishi. Kennismaken met het werken bij deze hoogwaardige bedrijven is voor de studenten van buitengewone betekenis. Ik wil daarom mijn dank uitspreken aan deze maar ook aan andere hier niet genoemde organisaties voor het feit dat zij deze mogelijkheid aan onze studenten hebben geboden.

Internationale activiteiten hebben in onze groep eigenlijk altijd al een belangrijke plaats ingenomen, hetzij in de vorm van het organiseren van of het bijdragen aan congressen, symposia of cursussen of in de vorm van het meedoen aan internationale onderzoekprojecten. Mijn zeer gewaardeerde leermeesters en latere collega's Van Eldik Thieme, De Pater, Koiter en Segel hebben mij in het vak gestimuleerd en de weg gewezen naar de internationale wetenschappelijke

acquainted with professional engineering practice in a high quality industrial environment is of great importance for the young student in his final phase of the study. I would like to express my sincere thanks to these but also to the many other organisations not mentioned here by name for the training opportunities they have provided for our students.

International relations and research engagements have always been prominent matters in our group. These may be the organization of or the contribution to congresses, symposia, courses or seminars or the cooperation in international research projects but also hosting of foreign guest researchers which has always been very rewarding. My highly esteemed former teachers Van Eldik Thieme, De Pater, Koiter and Segel have stimulated me in my field of profession and have shown the way to the international scientific community. For this, I am still very grateful. One of the prominent achievements is the establishment of the *International Association for Vehicle System Dynamics* with its biennial Symposium and its successful journal *Vehicle System Dynamics*. With pleasure I will continue to contribute to these activities also in the future.

I thank you for your kind attention!

wereld en daar ben ik hen nog steeds zeer dankbaar voor. Een van de verworvenheden is de *International Association for Vehicle System Dynamics* met z'n tweejaarlijkse symposium en z'n succesvolle tijdschrift *Vehicle System Dynamics*. Met plezier zal ik ook in de toekomst mijn bijdragen aan deze activiteiten blijven geven.

Ik dank U voor Uw gewaardeerde aandacht!

## WHEELS

---

side force

slip angle

brake slip

brake force

