

## 2.376 – Verkeersveiligheid en de fiets; over de stabiliteit van het voertuig

Arend L. Schwab  
Faculteit 3mE/PME  
Technische Universiteit Delft  
[a.l.schwab@tudelft.nl](mailto:a.l.schwab@tudelft.nl)  
<http://bicycle.tudelft.nl/schwab/>

### Samenvatting

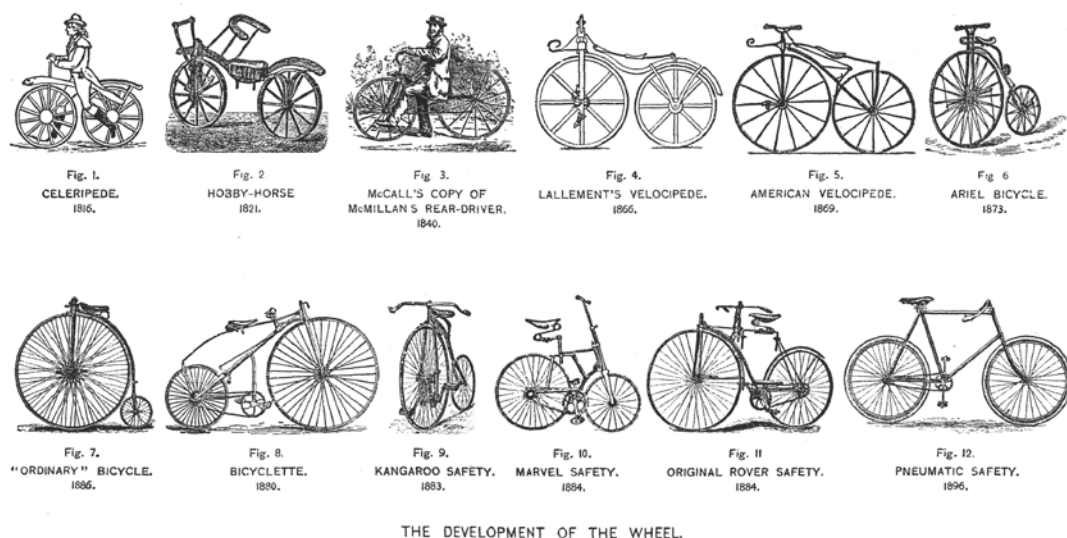
Het aantal verkeersdoden en gewonden onder fietsers is nog steeds veel te hoog en neemt alleen maar toe. Waar ligt dit aan? Een aspect is het voertuig zelf: de fiets. Een zeer handig maar uiterst labiel voertuig. Wat weten wij eigenlijk over de stabiliteit en besturing van de fiets?

### Inleiding

Een kwart van alle verkeersdoden en de helft van alle ernstige verkeersgewonden in Nederland zijn fietsers. Het aantal verkeersdoden bij andere vervoerswijzen daalt sneller dan bij fietsers, sterker nog, de laatste tien jaar stijgt zelfs het aantal gewonden onder fietsers [1]. Het verkeersveiligheids-onderzoek richtte zich tot nu toe vooral op het autoverkeer en is er nog maar weinig bekend over (het verbeteren van) de verkeersveiligheid van fietsers. Een van de aspecten van deze verkeersveiligheid is het voertuig zelf: de fiets.

De fiets zoals we die nu kennen is al meer dan 100 jaar oud, zie Figuur 1. Valt er dan nog wel iets te veranderen aan het voertuig? Zeker, aangezien de markt om andere dan standaard toepassingen vraagt. Denk bijvoorbeeld aan de vouwfiets of de ligfiets. Deze voertuigen komen steeds meer in trek maar vertonen ook nog steeds ondermaats rijgedrag. Een andere categorie, die van groot belang is voor de verkeersveiligheid, zijn fietsen voor ouderen. Recent verschijnen er steeds meer fietsen die speciaal voor ouderen zijn ontworpen, maar de ervaring leert dat deze niet echt populair zijn. Sterker nog, zijn deze wel ideaal qua stabiliteit en besturing voor de oudere weggebruiker?

In deze paper bekijken we de huidige kennis over de besturing en stabiliteit van de fiets. De rol van de bestuurder in dit proces en de mogelijkheden tot het komen van aangepaste ontwerpen.

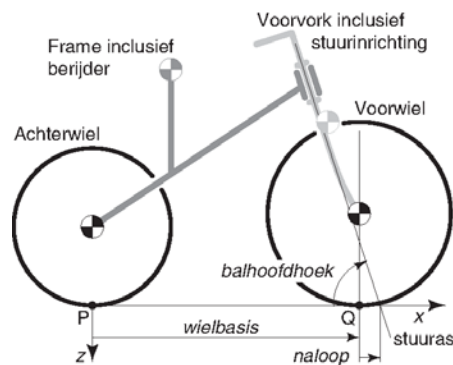


Figuur 1. De evolutie van de huidige fiets van 1816 tot 1896, naar [2].

## De Stabiliteit van de Fiets

Met maar twee contactpunten op de weg is de fiets een uiterst labiel voertuig. Als je hem vanuit stilstand loslaat, valt hij meteen om maar, als hij een beetje snelheid heeft, lijkt het wel of hij vanzelf rechtop blijft. Hoe komt dat nu? Sinds de uitvinding van de moderne fiets, zo rond 1890 (even grote wielen, luchtbanden, schuine voorvork en kettingaandrijving, zie Figuur 1) hebben vele mensen dit zich wel afgevraagd. De Franse wiskundige Emmanuel Carvallo [3] en de Engelse wiskundige en meteoroloog Francis Whipple [4] waren de eersten die rond 1899 een dynamische analyse maakten om in theorie te laten zien wat al in de praktijk bekend was, dat sommige fietsen uit zichzelf stabiel kunnen zijn als ze met de juiste voorwaartse snelheid rijden. Sindsdien is dit een steeds weer terugkerend onderwerp, zowel in de wetenschappelijke literatuur als in de meer populaire pers. Bij nader onderzoek blijken deze publicaties echter allemaal een beetje te verschillen, zowel wat model als wat conclusies betreft. Een recente publicatie van Meijaard *et al.* [5] presenteert het model van de fiets en de gevalideerde vergelijkingen die de beweging van de fiets beschrijven, welke ook dient als een benchmark. Tevens wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de literatuur op dit gebied.

Het is vrij eenvoudig om zelf experimenteel aan te tonen dat een fiets bij een beetje voorwaartse snelheid van zichzelf stabiel is. Neem een oude fiets en een grote open ruimte, bijvoorbeeld een parkeerplaats. Breng de fiets al rennend op gang, laat hem los en geeft een duwtje opzij. Als de snelheid te laag is, gaat hij steeds erger slingeren en valt hij uiteindelijk om: instabiel dus. Maar je zult zien dat boven een bepaalde snelheid de fiets zich vanzelf weer opricht: stabiel dus! Filmpjes hiervan zijn te zien op [6].



Figuur 2. Model van de fiets, met stuuras, balhoofdhoek en naloop, naar [5].

Echter, zelfs met deze vergelijkingen in de hand is nog niet meteen duidelijk waarom de fiets nu zo stabiel is bij een beetje snelheid. Vraag het aan een willekeurig, enigszins technisch onderlegd, persoon en hij zal zeggen: „Door het gyroscopische effect van de wielen.” Of hij zal zeggen: „Door de schuine stand van de stuuras, de naar voren gebogen voorvork en doordat het contactpunt van het voorwiel zich achter de stuuras bevindt, de naloop.”, zie Figuur 2. Inderdaad, als je het opzoekt in de literatuur spreekt iedereen over het stabiliserende effect van de draaiende wielen [7] en het gunstige effect van de naloop [8] op de stabiliteit van de fiets. Maar is dit noodzakelijk? Wederom zegt de literatuur [7,8] dat dit noodzakelijke ingrediënten zijn voor zelfstabiliteit. Echter, als wij in ons fiets model [5] de parameters zo veranderen dat wij een fiets zonder draaiende wielen en zonder naloop maken blijkt dat voor sommige massaverdelingen wij hem wel stabiel kunnen laten bewegen. Sterker nog, wij hebben zo een fiets gemaakt, zie Figuur 3. Je kan er nu niet direct op fietsen, maar het zijn twee wielen en een stuur en bij een beetje snelheid valt hij niet om. Sterker nog, bij een beetje snelheid kan je hem een duwtje opzij geven waarna hij vanzelf weer overeind komt. Dit is het onderwerp van de recente publicatie in Science [9], filmpjes hiervan zijn te zien op [10].



Figuur 3. Two-mass-skate bicycle, zelfstabil zonder gyros en zonder naloop [9,10].

Misschien wel de belangrijkste conclusie van dit recente onderzoek is dat wij hebben aangetoond dat noch het gyroscopische effect van de wielen noch de naloop noodzakelijk is voor stabiliteit. Wij hebben laten zien dat een derde factor, de massaverdeling van de fiets en in het bijzonder de massaverdeling van de stuurinrichting, ook belangrijk is. Het is verrassend om te zien dat bijna iedere fiets die stabiel is, instabiel gemaakt kan worden door het aanpassen van de traagheidsmomenten van de wielen, de naloop of de massaverdeling en omgekeerd ook bijna iedere instabiele fiets door het aanpassen van deze ontwerpparameters stabiel gemaakt kan worden. Dit is misschien een aanwijzing dat, naast de huidige evolutionair ontstane fietsen, er nog veel nieuwe soorten fietsen te ontwerpen zijn met interessante vormen en eigenschappen.

### De Balans

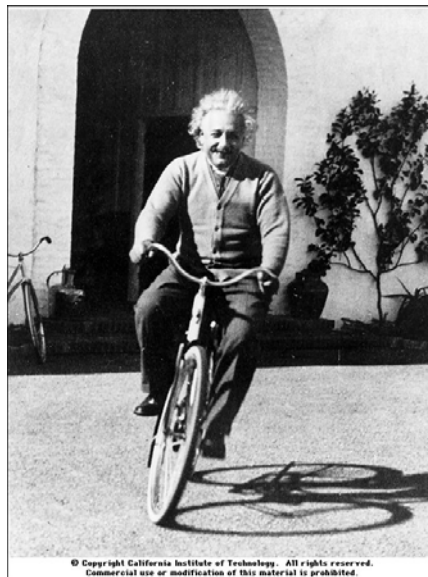
Hoe balanceer je eigenlijk een fiets? Wel, net zoals je een omgekeerde slinger (*lees* stok) op je open hand balanceert. Als de stok naar rechts valt, beweeg je snel je hand naar rechts om het contactpunt weer onder het zwaartepunt te brengen en *vice versa*. Hetzelfde doe je bij een fiets, maar dan indirect met behulp van het stuur. Als de fiets naar rechts valt, stuur je naar rechts om je contactpunten weer onder je te brengen. Dit werkt natuurlijk alleen maar als de fiets rijdt en hoe harder je rijdt hoe makkelijker het gaat. Wij noemen dit "sturen in de richting van de val". Bij een stilstaande fiets gaat het een beetje als je een grote naloop hebt of een klein beetje naar voren en naar achteren kunt bewegen, zoals bij een doortrapper. Een uitgebreide discussie over alle balanceer mogelijkheden is te lezen in de bijlage bij Kooijman *et al.* 2011 [9].



Figuur 4. Volledig geïnstrumenteerde fiets en bereider voor het observeren van de besturing van de fiets. Experimenten uitgevoerd op de lopende band van de VU Amsterdam [11].

Ondanks deze vuistregel weten we verder maar weinig over de rol van de bestuurder. Inderdaad, je houdt een fiets overeind door te sturen in de richting van de val. Maar hoe doen we dat nu precies en hoe constateert de bestuurder dat hij aan het vallen is? Hier raken we de aspecten van het mens-machine systeem fiets plus berijder, waarvoor we een model van de regelende bestuurder willen

hebben. Helaas staat dit onderzoek nog in de kinderschoenen, wij weten nog maar heel weinig van de bestuurder. Recente observaties van fietsers rijdend op een geïnstrumenteerde fiets in het verkeer of op een lopende band, zie Figuur 4, hebben aangetoond dat de besturing veelal wordt gedaan door middel van het stuur en niet door middel van de beweging van het bovenlichaam [11]. Het kan wel, want de meeste mensen kunnen wel met losse handen rijden. Maar bij normaal fietsen zien wij dat de bestuurder alleen maar met zijn bovenlichaam heen en weer beweegt om te compenseren voor het trappen. Hij oefent er geen balancerende regeling mee uit. Wel zien we dat bij zeer lage snelheid ineens de knieën naar binnen en buiten worden bewogen om te balanceren en niet het bovenlichaam. Een bekend voorbeeld hiervan uit de geschiedenis is de afbeelding van Albert Einstein op de fiets, Figuur 5. De verklaring hiervoor is dat bij lage snelheid het sturen haast geen effect meer heeft op het verplaatsen van de contactpunten van de fiets, dus wordt er een extra balansmechanisme ingeschakeld.



Figuur 5. Albert Einstein op de fiets, merk op de positie van zijn knieën.

### **De Besturing**

Hoe bestuur je nu eigenlijk een fiets? Natuurlijk met het stuur, maar wat doe je nu precies als je een bocht wil maken? Het antwoord is even eenvoudig als vreemd. Om een bocht naar rechts te maken moet de bestuurder eerst kort naar links sturen om het voertuig in de juiste leunstand te krijgen. Wij zijn ons hier niet echt van bewust, maar deze eigenschap zorgt er wel voor dat je fietsen moet leren, het gaat niet vanzelf. Het aardige is ook dat wij nu meteen het voordeel zien van de labiele fiets. Voor het eenvoudig manoeuvreren maken we dus handig gebruik van de zijwaartse instabiliteit.

### **Conclusies en Aanbevelingen**

De opkomst van de oudere fietser en ook de elektrisch ondersteunde fiets vraagt om een nadere bestudering van de bestuurbaarheid en stabiliteit van het voertuig. Zeker in het licht van de stijging van het aantal ernstig gewonden, in het bijzonder onder de oudere fietser. Als wij om ons heen kijken zien we dat de fiets speciaal ontworpen voor deze groep gebruikers nog steeds erg veel lijkt op de gewone fiets. Inderdaad, het huidige fietsontwerp is het resultaat van een evolutionair en dus incrementeel proces. Echter, met de nieuwe kennis en gereedschappen zijn wij nu in staat de gehele ontwerpruimte te benutten en dus fietsen te ontwerpen die direct aan de behoefte van de bestuurder zijn aangepast. Maar daarvoor moeten we wel eerst meer weten over de bestuurder, wat is een goed model voor deze regelende mens? De kennis hiervan staat nog in de kinderschoenen en er is dus nog een grote vraag naar fundamenteel onderzoek op dit gebied.

## Dankbetuiging

Met dank aan Jodi Kooijman (TU Delft), Jaap Meijaard (UTwente) Jason Moore (UCDavis), Jim Papadopoulos (Northeastern University) en Andy Ruina (Cornell University) voor de samenwerking in het Delftse onderzoek naar de stabiliteit en besturing van fietsen.

## Referenties

- [1] SWOV-schrift, Fietspecial, Nummer **126**, Najaar 2011, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, [http://www.swov.nl/rapport/Ss\\_RA/Ss126.pdf](http://www.swov.nl/rapport/Ss_RA/Ss126.pdf)
- [2] Means, J. (1896). Wheeling and flying. *The Aeronautical Annual* 1896, 2:23-25.
- [3] Carvallo, E. (1899). *Théorie du mouvement du monocycle et de la bicyclette*. Gauthier-Villars, Paris, France.
- [4] Whipple, F. J. W. (1899). The stability of the motion of a bicycle. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, **30**:312-348.
- [5] J. P. Meijaard, Jim M. Papadopoulos, Andy Ruina, and A. L. Schwab (2007) Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review, *Proceedings of the Royal Society A* **463**:1955-1982. Available at: <http://bicycle.tudelft.nl/benchmarkbicycle/>
- [6] Yellow Bicycle Self-Stability Demos: <http://bicycle.tudelft.nl/yellowbicycle/>
- [7] F. Klein and A. Sommerfeld. *Über die Theorie des Kreisels*. Teubner, Leipzig, 1910. Ch IX §8, Stabilität des Fahrrads, by F. Noether, pp. 863–884.
- [8] D. E. H. Jones. The stability of the bicycle. *Physics Today*, **23**(4):34–40, 1970.
- [9] J. D. G. Kooijman, J. P. Meijaard, Jim M. Papadopoulos, Andy Ruina, and A. L. Schwab (2011) A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects, *Science* 15 April 2011, **332**(6027):339-342.
- [10] Two-mass-skate bicycle: <http://bicycle.tudelft.nl/stablebicycle/>
- [11] Jason K. Moore, J. D. G. Kooijman, A. L. Schwab, and Mont Hubbard (2011) Rider motion identification during normal bicycling by means of principal component analysis, *Multibody System Dynamics* **25**(2):225-244.