

Iedereen een fiets op maat

Wiskundigen breken zich al bijna anderhalve eeuw het hoofd over de fiets. Hoe is het toch mogelijk dat een rijdende fiets uit zichzelf al zo stabiel is? Delftse onderzoekers menen nu het ultieme model gemaakt te hebben. Fietsfabrikant Batavus wil het gebruiken om betere fietsen te maken voor ouderen en gehandicapten.

TOMAS VAN DIJK

In rap tempo rolt een lopende band onder ir. Jodi Kooijman en zijn fiets door. De fervent mountainbiker trapt totdat zijn snelheidsmeter zestien kilometer per uur aangeeft. Vanaf de zijlijn geeft dr.ir. Arend Schwab van Werktuigbouwkunde, Maritieme Techniek en Technische Materiaalwetenschappen (3mE) op het afgesproken moment een flinke ruk aan een touw dat aan de bagagedrager vastzit. Even maakt Kooijman een zwiepende beweging naar rechts, maar zijn fiets herstelt zich in een fractie van een seconde. Het lijkt alsof hij automatisch de ideale lijn terugvindt. Dit schouwspel op video vond plaats op een grote lopende band van de afdeling bewegingswetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam. Het is een van de experimenten waarmee de twee onderzoekers van 3mE de afgelopen jaren een wiskundig model toetsten, waarin ze alle krachten die op de fiets spelen uitwerkten. Een publicatie

wieler wiebelt wat, het stuur draait heen en weer, maar de fiets komt weer op koers.

“De snelheid moet tussen de veertien en de zevenentwintig kilometer per uur liggen”, zegt Kooijman. “Dan is deze fiets van zichzelf stabiel. Als hij sneller gaat, zwiept hij minder heen en weer. Maar geef je hem een zijdelingse zet, dan helt hij in zijn geheel een kant op, totdat hij valt. De gegevens komen precies overeen met wat ons model voorspelde.”

Formule op formule

Al sinds de uitvinding van de door trappers aangedreven tweewieler, rond 1860, proberen onderzoekers te doorgronden hoe het komt dat een fiets al uit zichzelf vrij stabiel is. Ze stapelden formule op formule, stuk voor stuk afgeleid uit de bewegingswetten van Newton en Euler. Maar ze zijn er nooit in geslaagd een volledig correct model te ontwikkelen waarmee je de rijeigenschappen daadwerkelijk kunt voorspellen.

“Fietsfabrikanten hebben ook nooit geweten hoe een fiets precies werkt”, vertelt Schwab. “Ze hebben hun fietsen altijd experimenteel moeten verbeteren. Daar is op zichzelf niets mis mee. Maar met ons model kunnen ze alle factoren die van invloed zijn op de besturingseigenschappen in de computer invoeren. Het model rekent vervolgens uit hoe de fiets zich zal gedragen bij verschillende snelheden.” De Delftenaren hebben in samenwerking met collega’s van de Amerikaanse Cornell University en de universiteit van Nottingham in Groot-Brittannië ruim vijftig publicaties onder de loep genomen, die wetenschappers sinds het begin van het fietstijdperk schreven over dit onderwerp. Volgens veel van de wiskundigen dankt de fiets zijn stabiliteit vooral aan het feit dat het moeite kost om draaiende massa van richting te doen veranderen: het gyroscopisch effect. “Het gyroscopisch effect speelt zeker een rol”, zegt Schwab. Ter demonstratie haalt hij een wiel tevoorschijn dat rondom met lood is verzwaard. Hij geeft er een harde zwengel aan. Alleen met grote moeite is het nog mogelijk het wiel van richting te veranderen.

Wetenschappers zijn er nooit in geslaagd een correct model te ontwikkelen waarmee je de rijeigenschappen daadwerkelijk kunt voorspellen

over dit fietsmodel stond onlangs in het wetenschappelijke tijdschrift PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY. Schwab toont nog een filmpje. Hierin geeft Kooijman een fiets een flinke zet. De fiets hangt vol meetapparatuur en heeft een laptop op de bagagedrager die alle bewegingen registreert. Tientallen meters rijdt de onbemande fiets rechtuit in de sporthal van de TU Delft. Kooijman rent er achteraan en geeft de fiets een zijdelingse duw. De twee-





FOTO: SAM KENTMEESTER/FMAX

Arend Schwab legt fietsonderzoek uit met speelgoedfietsje.

“Maar wiskundigen die te veel uitgingen van dit principe, zaten er naast”, vervolgt Schwab. “In ons model hebben we het gewicht van wielen verwaarloosd en ook toen nog bleek het mogelijk de fiets stabiel te maken. Dat fietsen met kleine wielen niet stabiel zouden zijn, klopt trouwens ook niet.”

Tegensturen

Intuïtief kent iedereen het belangrijkste samenspel van krachten dat ervoor zorgt dat we rechtop blijven fietsen: de combinatie hellen en sturen. Het verklaart waarom

we, als we een bocht naar rechts willen maken, eerst ons stuur een beetje naar links draaien. Door dit zogenaamde tegensturen ontstaat een kracht die de fiets de andere kant op doet hangen: de kant waar we eigenlijk naartoe willen. Het verklaart ook waarom we vallen als we te dicht langs een stoeprand fietsen: we komen er niet meer van weg zonder de stoep te raken.

Voor het stuur geldt dat hoe schuiner de voorvork van de fiets naar beneden steekt, hoe stabiel de fiets rechttuit gaat, maar hoe lastiger hij de bocht om gaat. “Maar ook de massaverdeling is ontzettend belangrijk”, vertelt Kooij-

Anderhalve eeuw fietsonderzoek

Dat je op de velocipedes, zoals de voorwiel aangedreven fiets in de beginjaren heette, de bocht om gaat door eerst wat ‘tegen te sturen’, werd al in 1869 door de Schotse ingenieur en natuurkundige William John Macquorn Rankine aangetoond. Maar dat je door tegensturen ook je evenwicht houdt, werd pas in 1897 aangetoond door de Franse wiskundige Emmanuel Carvallo, in zijn honderdtachtig pagina’s tellende prijswinnende monografie over de dynamica van één- en tweewielers.

De Fransman was ook de eerste die zich realiseerde dat de ‘naloop’ ontzettend belangrijk is voor de stabiliteit van fietsen. De naloop is het verschil tussen het raakpunt van een

denkbeeldig doorgetrokken lijn van de fietsvork tot de weg en het raakpunt van het voorwiel op de weg. Door de naloop volgt het wiel de richting van het voertuig. Voertuigen met een grote naloop, zoals een ‘opoeifiets’ of een Harley Davidson, rijden stabiel, maar maken minder gemakkelijk een bocht dan voertuigen met kleine naloop. “Jammer genoeg had Carvallo het gewicht van de voorvork in zijn model verwaarloosd”, zegt Schwab. “Zijn model klopte hierdoor niet helemaal.”

Rond de eeuwwisseling publiceerde ook de Britse wiskundige Francis Whipple een model over de rijeigenschappen van de fiets. “Hij deed het heel goed”, zegt Schwab. “Maar er zitten wat

kleine foutjes in zijn vergelijkingen. Plussen en minnen zijn waarschijnlijk bij de druk van zijn artikel per ongeluk omgewisseld. We kunnen daardoor geen harde conclusies uit zijn werk trekken.”

De Duitse onderzoeker Ekkehard Döhring was de eerste die een volledig correct model presenteerde voor de zelfstabiliserende eigenschappen van een tweewieler. Hij experimenteerde hiervoor ook met een aantal motorfietsen. In 1955 schreef hij er een proefschrift over. Maar hij heeft nooit experimenteel kunnen aantonen dat zijn model klopte.

man. “Door het zwaartepunt van de fiets wat naar voren te schuiven, maak je de fiets ook stabiel.”

Vijfentwintig van dit soort parameters verwerkten de Delftenaren in hun model. Allemaal hebben ze betrekking op de twee gekoppelde bewegingsvergelijkingen: die voor het leunen en voor het sturen. “Wat precies alle effecten zijn van deze parameters op de stabiliteit, is nog niet duidelijk”, zegt Schwab. “Uiteindelijk komen deze parameters in vrij complexe vorm voor als coëfficiënten van de bewegingsvergelijkingen. Om er nog mee uit de voeten te kunnen, versimpelden de meeste onderzoekers de vergelijkingen door bepaalde parameters te verwaarlozen. Maar dat pakt meestal slecht uit. Onderzoekers die de link niet legden tussen het leunen en sturen, waren al helemaal met een hopeloze exercitie bezig.”

Nervus fietsje

Een model dat aangeeft of een ontwerp een nerveus fietsje oplevert of juist een stabiel exemplaar voor bijvoorbeeld ouderen, daar heeft de fietsindustrie wel oren naar. Hoofd productontwikkeling van fietsfabrikant Batavus, Rob van Regenmortel, volgt het onderzoek van de Delftenaren op de voet.

Van Regenmortel: “Bij het ontwerpen van onze fietsen werken we van oudsher met drie parameters: de algehele geometrie, de afstand tussen de assen en de hoek waaronder de voorvork naar beneden steekt. De meeste eigenschappen hebben we al in de jaren zeventig vastgesteld. Zoals de hoek van de buis waarop het zadel zit. De buis

‘Fietsfabrikanten hebben ook nooit geweten hoe een fiets precies werkt’

staat op onze opoefietsen vrij recht. Bij Gazelle steekt hij daarentegen wat meer naar achteren. Dat zijn zo van die keuzes die alle fietsfabrikanten ooit eens gemaakt hebben en waar ze nauwelijks nog vanaf zijn geweest omdat de fietsen het goed bleken te doen. Maar met het model van Schwab hopen we binnenkort gerichter fietsen te kunnen ontwerpen voor speciale doelgroepen.”

Van Regenmortel wil met Schwab en Kooijman meewerken aan een vervolgpriject, waarbij ook het rijgedrag van de bestuurder wordt onderzocht. Het uiteindelijke doel van dit fietsonderzoek is om het menselijke rijgedrag mee te nemen in het model, zodat ze het samenspel van de fiets en de bestuurder kunnen onderzoeken. “Hierdoor kunnen we in principe voor iedereen een fiets op maat maken”, zegt Van Regenmortel. “Mensen die moeilijk hun evenwicht kunnen houden, hoeven dan niet meer op een driewieler te rijden.”

Het model moet uiteindelijk ook de communicatie naar de klant verbeteren. “Misschien kunnen we zelfs cijfertjes aan de fiets hangen, die wat zeggen over de rijeigenschappen. Mensen die met zware bepakking op fietsvakantie gaan, raden we dan bijvoorbeeld een fiets aan met rijeigenschap nummer twee. En iemand die alleen naar zijn werk en terug wil, raden we een wat nerveuzere fiets aan met nummertje vier. Ik noem maar wat.”

Maar hoe meet je het rijgedrag van mensen? Op de lopende band in Amsterdam probeerden Kooijman en Schwab al wat gegevens te verzamelen over een bemande fiets, door zelf op de fiets te zitten. “Doodeng is het”, zegt Kooijman. “Je fiets met behoorlijk tempo in een afgesloten ruimte, zonder dat je vooruit komt. Dat voelt heel gek. Je bent continu bang tegen de muur aan te knallen. We kunnen ouderen en mensen met een handicap niet op deze manier laten fietsen om gegevens te verzamelen. We moeten deze tests daarom in de toekomst op de weg uitvoeren en vervolgens het fietsgedrag in een ‘robotfiets’ nabouwen.”

Meer informatie:

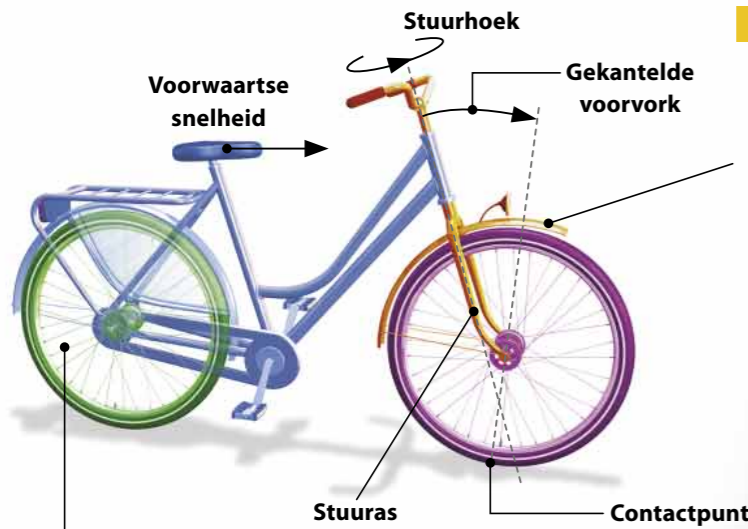
dr.ir. Arend L. Schwab, a.l.schwab@tudelft.nl, (015) 2782701,

www.ocp.tudelft.nl/em/staf/schwab/



Leren fietsen. Het principe van leunen en sturen is niet gemakkelijk aan te leren, maar je verleert het nooit meer.

Om een bocht naar links te maken



FIETSEIGENSCHAP 1

Stuur wil terug naar rechte stand

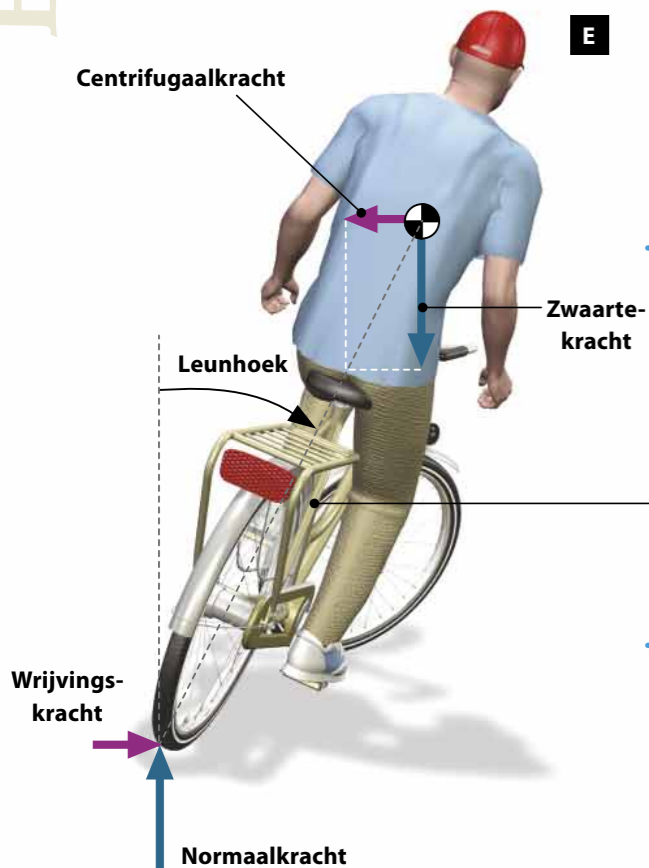
De voorvork van de fiets staat scheef ten opzichte van de verticaal (bijv. 18 graden). Door deze scheefstand (en de kromming van de voorvork) ligt het contactpunt van het voorwiel met de weg achter de stuuras. Hierdoor oefenen de krachten in dat contactpunt – als het stuur gedraaid is – een corrigerend moment uit om de stuuras, die het stuur terug in de rechte stand wil trekken. Als een fietser met losse handen rechttuit rijdt, worden kleine verstoringen in de stand van het stuur zo vanzelf gecorrigeerd.

Fietsmodel

De balans en het stuurgedrag van een fiets zijn gesimuleerd met een fietsmodel. Dit model gebruikt 25 parameters om de fiets te beschrijven (vier lichamen: achterwiel, achterframe + fietser, voorframe en voorwiel) en heeft drie vrijheidsgraden: leunhoek, stuurhoek en voorwaartse snelheid. De resultaten van het rekenmodel komen precies overeen met die van de experimenten. Het model laat bovendien goed zien dat er niet één parameter is die het dynamische gedrag van een fiets domineert. Zo levert bijvoorbeeld het gyroscopisch effect van de wielen een bijdrage aan de stabiliteit. Maar ook zonder dit effect, d.w.z. bij een fiets met massalozere wielen, kan de fiets zelf-stabiel zijn.

Fiets maakt bocht naar links

Het stuur draait steeds verder door naar links terwijl de fiets steeds meer naar links leunt. De fiets maakt nu een bocht naar links. Na 2 seconden zijn de stuurhoek en leunhoek maximaal, respectievelijk 10 en 14 graden.



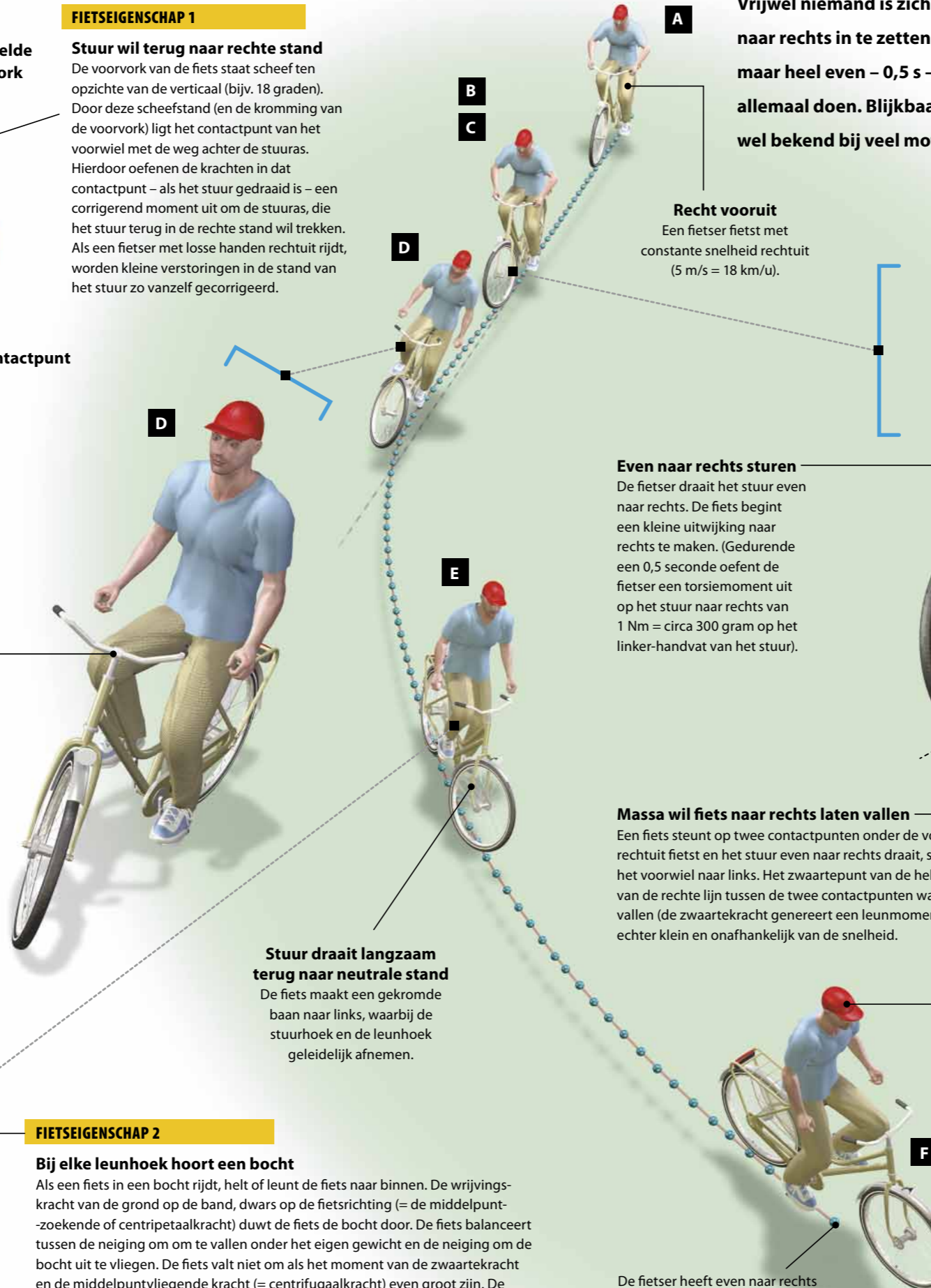
FIETSEIGENSCHAP 2

Bij elke leunhoek hoort een bocht

Als een fiets in een bocht rijdt, helt of leunt de fiets naar binnen. De wrijvingskracht van de grond op de band, dwars op de fietsrichting (= de middelpuntzoekende of centripetaalkracht) duwt de fiets de bocht door. De fiets balanceert tussen de neiging om om te vallen onder het eigen gewicht en de neiging om de bocht uit te vliegen. De fiets valt niet om als het moment van de zwaartekracht en de middelpuntvliegende kracht (= centrifugaalkracht) even groot zijn. De centrifugaalkracht hangt af van de grootte van de fietssnelheid en de diameter van de bocht. Deze evenwichtsvoorwaarde bepaalt dat bij een bepaalde constante fietssnelheid bij elke leunhoek één specifieke draaicirkel hoort.

... moet je even naar rechts sturen

Vrijwel niemand is zich ervan bewust dat hij of zij het fietsstuur even naar links draait om een bocht naar rechts in te zetten. Dit is niet zo raar, want de uitwijking is erg klein – circa 3 graden – en duurt maar heel even – 0,5 s –. Bandensporen van fietsexperimenten met natte banden tonen aan dat we het allemaal doen. Blijkbaar leren we dat onbewust, als we leren fietsen. Dit zogenaamde tegensturen is wel bekend bij veel motorrijders.



Recht vooruit
Een fietser fietst met constante snelheid rechttuit (5 m/s = 18 km/u).

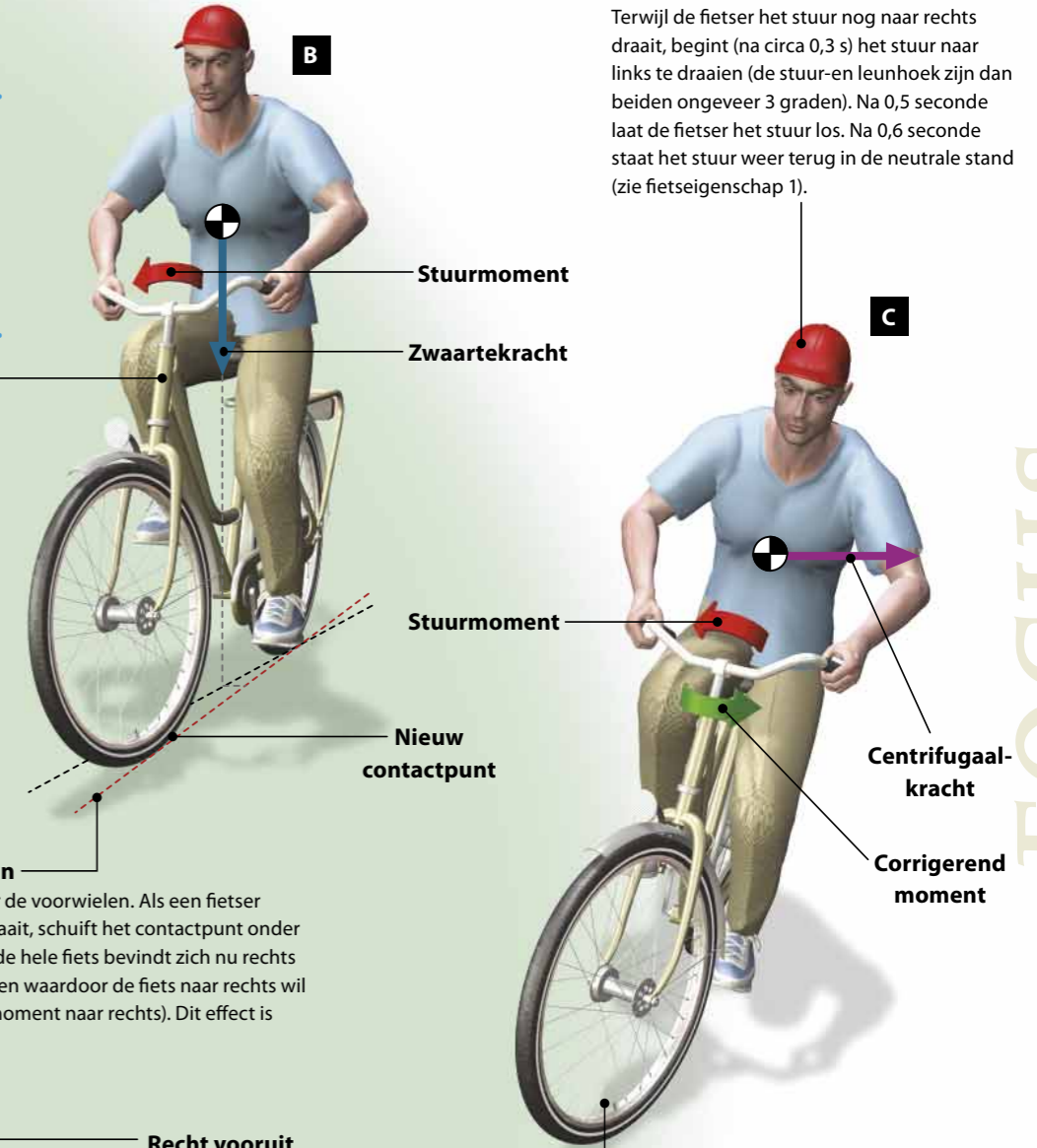
Even naar rechts sturen
De fietser draait het stuur even naar rechts. De fiets begint een kleine uitwijking naar rechts te maken. (Gedurende een 0,5 seconde oefent de fietser een torsiemoment uit op het stuur naar rechts van 1 Nm = circa 300 gram op het linker-handvat van het stuur).

Massa wil fiets naar rechts laten vallen
Een fiets steunt op twee contactpunten onder de voorwielen. Als een fietser rechttuit fietst en het stuur even naar rechts draait, schuift het contactpunt onder het voorwiel naar links. Het zwaartepunt van de hele fiets bevindt zich nu rechts van de rechte lijn tussen de twee contactpunten waardoor de fiets naar rechts wil vallen (de zwaartekracht genereert een leunmoment naar rechts). Dit effect is echter klein en onafhankelijk van de snelheid.

Recht vooruit
Na 10 seconden rijdt de fiets verder in een rechte baan.

Stuur draait naar links

Terwijl de fietser het stuur nog naar rechts draait, begint (na circa 0,3 s) het stuur naar links te draaien (de stuur- en leunhoek zijn dan beiden ongeveer 3 graden). Na 0,5 seconde laat de fietser het stuur los. Na 0,6 seconde staat het stuur weer terug in de neutrale stand (zie fietseigenschap 1).



FIETSEIGENSCHAP 3

Fiets valt naar links door naar rechts te sturen

De centrifugaalkracht (als gevolg van de bocht naar rechts) genereert een leunmoment naar links waardoor de fiets in de rechterbocht naar links wil vallen. Dit laatste effect is rechtevenredig met het kwadraat van de snelheid en is vrijwel altijd groter dan het effect als gevolg van de verschuiving van de contactpunten (bij voorwaartse snelheden groter dan 0,2 m/s = 0,7 km/u). Doordat het stuur naar rechts draait, valt/leunt de fiets dus naar links. De leunhoek neemt hierbij geleidelijk toe.

illustratie & tekst: Eric Verdult, www.kennisinbeeld.nl © 2007