

## Luchtweerstand

### 1 Inleiding

Een bewegend voertuig zoals een fiets, auto of vliegtuig ondervindt bijna altijd *luchtweerstand*. Bij het bewegen stroomt de lucht langs het voertuig. Het voertuig botst als het ware voortdurend tegen de lucht aan. Op het voertuig wordt dan een *luchtwrijvingskracht* uitgeoefend die de beweging tegenwerkt. Hoe groter deze luchtwrijvingskracht is, des te groter is het brandstofverbruik van het voertuig. Of – in het geval van fietsen – des te meer moeite je zelf moet doen om in beweging te blijven.

#### Luchtwrijvingskracht

Bij een beweging met constante snelheid is de netto-kracht op een voertuig nul, zoals weergegeven in figuur 1. Als we de andere wrijvingskrachten (zoals bijvoorbeeld de rolwrijvingskracht tussen de wielen en het wegdek) buiten beschouwing laten, is de voorwaartse kracht op het voertuig gelijk aan de achterwaartse luchtwrijvingskracht. Hoe groter deze luchtwrijvingskracht is, des te groter moet dus de voorwaartse kracht zijn om het voertuig met een constante snelheid te laten bewegen. En hoe groter de voorwaartse kracht is, des te groter is de arbeid die de motor of je eigen lichaam moet leveren voor het afleggen van een bepaalde afstand – en des te groter is het energieverbruik. Het is dus van belang om de luchtwrijvingskracht op een voertuig zo klein mogelijk te maken.

#### 1 Luchtweerstand verminderen

In de praktijk zijn er verschillende manieren om de luchtwrijvingskracht op een bewegend voertuig zo klein mogelijk te maken. In figuur 2 zie je een paar voorbeelden.

- Op welke manieren wordt in de situaties van figuur 2 de luchtwrijvingskracht zo klein mogelijk gemaakt? Welke andere manieren zijn er volgens jou ook nog?
- Welke veronderstellingen kun je hieruit afleiden over de factoren die invloed hebben op de grootte van de luchtwrijvingskracht op een bewegend voertuig?



Figuur 1 < Bij een constante snelheid is de netto-kracht op een voertuig nul: de voorwaartse kracht  $F_v$  is even groot als de achterwaartse luchtwrijvingskracht  $F_{w,l}$ . Daarbij laten we de achterwaartse rolwrijvingskracht op het voertuig buiten beschouwing.



Figuur 2 – Voorbeelden van situaties waarin de luchtwrijvingskracht op een bewegend voertuig zo klein mogelijk is gemaakt.

Een onderzoek naar het wel of niet juist zijn van deze veronderstellingen is in het verkeer zelf moeilijk uit te voeren. Het meten van de krachten op een bewegend voertuig is lastig. De veronderstellingen zijn makkelijker te controleren met metingen van de luchtwrijvingskracht als de lucht beweegt het voertuig stil staat. Dus: in een *windtunnel*. Voor metingen aan echte voertuigen moet zo'n windtunnel vrij groot zijn. Ook dat is lastig. Maar het onderzoek is ook uit te voeren met modelvoertuigen in een modelwindtunnel.

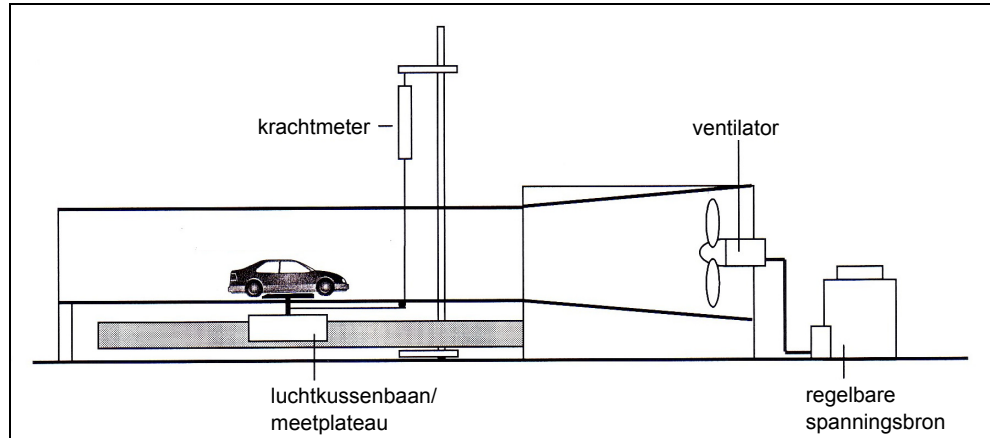
In het volgende onderdeel staat een beschrijving van de beschikbare *meetopstelling*. Daarin wordt duidelijk welke grootheden je in de meetopstelling kunt variëren en meten. Daarna kun je met die kennis de *onderzoeksvragen* formuleren, een *werkplan* opstellen, de *meetmethode* verkennen en het *experimenteel onderzoek* uitvoeren. Ten slotte gebruik je de resultaten van het experimenteel onderzoek om de luchtwrijvingscoëfficiënt te bepalen, en

ga je na of deze experimenteel bepaalde waarde in overeenstemming is met de *praktijkwaarden*.

## 2 Meetopstelling

### Windtunnel

In figuur 3 is de modelwindtunnel weergegeven. Deze meetopstelling bestaat uit een tunnel met een *ventilator* en een *meetplateau*.



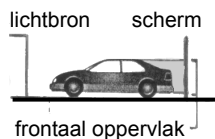
Figuur 3 – Modelwindtunnel voor het meten van de luchtwrijvingskracht op een voertuig.

De *ventilator* in de windtunnel is aangesloten op een regelbare spanningsbron. Daarmee is het toerental van de ventilator, en dus de luchtsnelheid in de tunnel te regelen. Deze luchtsnelheid  $v$  is te meten met een *anemometer* (windsnelheidsmeter) bij de uitstroomopening van de tunnel.

Op het *meetplateau* kan een modelvoertuig of een ander voorwerp worden geplaatst. Dit meetplateau zweeft op een lucht-kussenbaan om de invloed van andere wrijvingskrachten dan de luchtwrijvingskracht zoveel mogelijk uit te schakelen. De luchtwrijvingskracht  $F_{w,l}$  op het modelvoertuig is te meten met de krachtmeter (veerunster) buiten de tunnel.

### Frontaal oppervlak

De luchtwrijvingskracht op een voertuig of een ander voorwerp hangt onder andere af van het *frontaal oppervlak* van dat voertuig: het dwarsdoorsnede-oppervlak loodrecht op de bewegingsrichting. Met het in figuur 4 weergegeven onderdeel van de meetopstelling is het frontaal oppervlak  $A$  te meten met de *projectiemethode*.



Figuur 4 < De projectiemethode voor het meten van het frontaal oppervlak van een voertuig. De lichtbron levert een vrijwel evenwijdige lichtbundel. De schaduw van het voertuig is zichtbaar op het scherm met een millimerraster. Na het intekenen van de schaduwomtrek op het scherm is het frontaal oppervlak te bepalen door het aantal  $\text{mm}^2$  of  $\text{cm}^2$  te tellen.

## 3 Onderzoeksvragen en werkplan

In de *inleiding* heb je een aantal veronderstellingen geformuleerd over de factoren die invloed hebben op de grootte van de luchtwrijvingskracht op een bewegend voertuig. Uit de beschrijving van de beschikbare *meetopstelling* is af te leiden hoe je een onderzoek naar het wel of niet juist zijn van deze veronderstellingen kunt uitvoeren.

### 2 Onderzoeksvragen

Formuleer de *onderzoeksvragen* voor het experimenteel onderzoek met de modelwindtunnel. Stel voor elk van die onderzoeksvragen een *hypothese* op.

### 3 Werkplan

Maak een *werkplan* voor het experimenteel onderzoek met de modelwindtunnel. Geef in dat werkplan voor elk van de onderzoeksvragen aan welke grootheden je op welke

manier gaat variëren en meten om het wel of niet juist zijn van de opgestelde *hypothese* te kunnen controleren.

#### 4 Modelvoertuigen

Ga na welke modelvoertuigen en andere voorwerpen bij de meetopstelling beschikbaar zijn. Zoek of maak – als dat nodig is – de voor het experimenteel onderzoek benodigde modelvoertuigen. Informatie over de toegestane afmetingen van de zelfgebouwde modelvoertuigen is te vinden in de aanvullende beschrijving van de meetopstelling bij dit experiment.

## 4 Meetmethode

Voordat je nu in het volgende onderdeel bij opdracht 7 je *werkplan* kunt uitvoeren, is eerst een verkenning van de meetopstelling en de meetmethode nodig. Bij opdracht 5 doe je enkele oriënterende metingen om een indruk te krijgen van de meetonzekerheid in metingen van de luchtwrijvingskracht en van de windsnelheid. Bij opdracht 6 bepaal je het frontaal oppervlak van de modelvoertuigen en voorwerpen die je bij het experimenteel onderzoek gaat gebruiken.

#### 5 Luchtwrijvingskracht en luchtsnelheid

Een belangrijke eigenschap van de meetopstelling is dat de invloed van andere wrijvingskrachten dan de luchtwrijvingskracht zo klein mogelijk is. Maar deze ongewenste wrijvingskrachten zijn nooit helemaal uit te schakelen, en kunnen tot variaties in de gemeten luchtwrijvingskracht leiden. Met andere woorden: de metingen zijn niet goed *reproduceerbaar*. Daarnaast kan het resultaat van een meting van de luchtsnelheid afhangen van de positie van de windsnelheidsmeter voor de uitstroomopening van de windtunnel. In deze opdracht ga je na of die variaties optreden, hoe groot ze zijn, en hoe hun invloed te verkleinen is.

- **Meting** – Zet een modelvoertuig vast op het meetplateau, zodat het net boven de vloer van de windtunnel ‘zweeft’. Stel de regelbare spanningsbron voor de ventilator in op een bepaalde waarde, en verander deze instelling niet meer. Schakel de ventilator in met de schakelaar. Meet de luchtsnelheid  $v$  in de windtunnel en de luchtwrijvingskracht  $F_{w,l}$  op het modelvoertuig. Schakel dan de ventilator uit met de schakelaar, en laat de meetopstelling ‘tot rust komen’. Herhaal deze metingen (bij dezelfde instelling van de spanningsbron) een aantal keer. Wat is je conclusie: zijn de metingen voldoende reproduceerbaar?

Ga ook na of – en zo ja: hoe – de gemeten waarde van de luchtsnelheid  $v$  afhangt van de positie van de windsnelheidsmeter voor de uitstroomopening van de windtunnel.

- **Meetmethode** – Bedenk hoe je een meting van ‘de’ luchtsnelheid  $v$  en ‘de’ luchtwrijvingskracht  $F_{w,l}$  het beste zou kunnen uitvoeren. Hoe groot is dan ruwweg de *meetonzekerheid* in deze metingen?

#### 6 Frontaal oppervlak

Bepaal met de *projectiemethode* zo nauwkeurig mogelijk het frontaal oppervlak  $A$  van de modelvoertuigen en voorwerpen die je in het experimenteel onderzoek gaat gebruiken.

## 5 Experimenteel onderzoek

#### 7 Onderzoeksvragen

Zoek met behulp van de meetopstelling volgens je *werkplan* een antwoord op de *onderzoeksvragen*, en controleer de opgestelde *hypothesen*. Geef je meetresultaten zo mogelijk weer in de vorm van diagrammen.

## 6 Theorie: stromingsverschijnselen

De resultaten van het *experimenteel onderzoek* zijn te controleren met behulp van de theorie over stromingsverschijnselen. Deze theorie beschrijft onder andere hoe de luchtwrijvingskracht op een bewegend voertuig afhangt van factoren als de stroomlijn, het frontaal oppervlak en de snelheid van het voertuig.

## 8 Luchtwrijvingskracht

De luchtwrijvingskracht  $F_{w,l}$  op een bewegend voertuig of voorwerp wordt volgens de theorie over stromingsverschijnselen gegeven door:  $F_{w,l} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$ . In deze formule is  $F_{w,l}$  de luchtwrijvingskracht op het voorwerp,  $\rho$  de dichtheid van de lucht,  $A$  het frontaal oppervlak en  $v$  de snelheid van het voorwerp. De evenredigheidsconstante  $c_w$  wordt de *luchtwrijvingscoëfficiënt* genoemd. Deze luchtwrijvingscoëfficiënt geeft de invloed van de 'stroomlijn' van het voorwerp: hoe beter de stroomlijn is, des te kleiner is de  $c_w$ -waarde.

- a Controleer – zo mogelijk – of de resultaten van het *experimenteel onderzoek* in overeenstemming zijn met deze *theorie* over stromingsverschijnselen.
- b Geef – zo mogelijk – aan wat de resultaten van het experimenteel onderzoek voor de praktijk betekenen. Dus: geef antwoord op vragen als 'met hoeveel procent daalt het energieverbruik van een voertuig als ...', of 'met hoeveel procent neemt bij eenzelfde vermogen de snelheid van een voertuig toe als ...' – of een vergelijkbare vraag die past bij het uitgevoerde experimenteel onderzoek.

## 9 Luchtwrijvingscoëfficiënt

Uit de resultaten van het *experimenteel onderzoek* is voor een of meer modelvoertuigen en standaardvormen de luchtwrijvingscoëfficiënt (of: de  $c_w$ -waarde) te bepalen. In de praktijk zijn vergelijkbare metingen gedaan aan 'echte' voertuigen en voorwerpen. Uit een vergelijking kan blijken in hoeverre het onderzoek met de windtunnel 'model staat' voor de praktijk.

- a Bepaal de luchtwrijvingscoëfficiënt van de in het onderzoek gebruikte modelvoertuigen en standaardvormen.
- b Zoek in de literatuur praktijkgegevens over de luchtwrijvingscoëfficiënt van vergelijkbare voertuigen. Vergelijk deze praktijkgegevens met de in het onderzoek gevonden  $c_w$ -waarden. Zijn de resultaten van het onderzoek aan modelvoertuigen in de windtunnel ook in de praktijk bruikbaar?
- c Vergelijk de gevonden  $c_w$ -waarden van de standaardvormen met de officiële waarden in de literatuur. Hoe groot is de afwijking (in %) tussen de experimentele en de officiële waarde van  $c_w$ ?

## 7 Rapportage

Rapporteer over dit onderzoek in de vorm van een schriftelijk *verslag* of een mondelinge *presentatie*. Zorg ervoor dat in dit verslag of deze presentatie de volgende onderdelen duidelijk naar voren komen: de onderzoeksvragen, de meetopstelling, de resultaten van het experimenteel onderzoek samen met het antwoord op de onderzoeksvragen, de (aanvullende) bepaling van de luchtwrijvingscoëfficiënt, en de bruikbaarheid van dit soort modelonderzoek voor de praktijk.

Lever het verslag in bij je docent, samen met het *logboek* dat je bij de voorbereiding en de uitvoering van dit onderzoek hebt bijgehouden. Bij een rapportage in de vorm van een presentatie lever je alleen het logboek in bij je docent.