

3 Brandstofverbruik in het verkeer

Energie en arbeid



Inhoud

- 3.1 Inleiding
- 3.2 Arbeid en brandstofverbruik
- 3.3 Motorvermogen en snelheid
- 3.4 Motorrendement
- 3.5 Afsluiting

SLO_KoKo

Lesmateriaalvoorbeeld | Kwadrant C | Centrale context

2015 | Koos Kortland

3.1 Inleiding



Figuur 1 Brandstofverbruik in het verkeer hangt onder andere af van de snelheid waarmee wordt gereden.



Figuur 2 De nieuwe maximumsnelheid op de helft van de snelwegen in Nederland.



Figuur 3 Het opladen van een elektrische auto met stroom uit het elektriciteitsnet.

Elke dag zijn in Nederland een paar miljoen mensen onderweg van huis naar school, bedrijf of kantoor, naar vrienden of familie. Mensen verplaatsen zich lopend, met de fiets of brommer, met de auto, bus, trein of boot. Een groot deel van dat verkeer is gemotoriseerd. Met behulp van een motor kunnen we ons gemakkelijk en snel over grote afstanden verplaatsen. Daarvoor is **brandstof** nodig, zoals benzine, dieselolie en lpg.

1 Snelheid en brandstofverbruik

Vanaf september 2012 mogen automobilisten op de helft van de snelwegen 130 km/h rijden, in plaats van 100 of 120 km/h. Tegenstanders vinden deze maatregel slecht voor het milieu en voor de veiligheid. Ook is een hogere snelheid duur in brandstofverbruik. Met dat laatste is niet iedereen het eens, zo blijkt uit het fragment van een krantenartikel hieronder.

“Gelul”, meent Kees de Kok (34) inzake de laatste overweging. “Als ik hard rij, ben ik tien minuten eerder thuis. Dan verbruik ik dus voor tien minuten minder benzine.” Zie daar maar eens een speld tussen te krijgen.

Bron: *de Volkskrant*, 3 september 2012

- a Eerst maar eens die “tien minuten eerder thuis” (vanaf zijn werk, nemen we maar aan) bij een snelheid van 130 in plaats van 120 km/h op de snelweg. Hoe ver zou Kees dan op zijn minst van zijn werk wonen? Hoe realistisch lijkt je dat?
- b Dan dat “voor tien minuten minder benzine” verbruiken. Welke denkfout maakt Kees hier volgens jou?
- c Probeer een schatting te maken van de toename van het brandstofverbruik bij een verhoging van de snelheid van 100 naar 130 km/h. Bedenk daarbij dat de luchtweerstandskracht op een voertuig afhangt van het kwadraat van de snelheid.

2 Elektrische auto

Auto's die op benzine, dieselolie of lpg rijden, stoten het broeikasgas CO₂ uit. Dat kan niet anders bij het verbranden van fossiele brandstoffen. Een alternatief is de elektrische auto. Voorstanders daarvan zeggen nogal eens iets als: “Elektrische auto's zijn milieuvriendelijk, want ze rijden niet op fossiele brandstof en stoten dus geen CO₂ uit. Bovendien zijn ze een oplossing voor het probleem dat fossiele brandstoffen opraken.”

- a Geef je commentaar op deze uitspraken. Bedenk daarbij hoe in Nederland elektriciteit wordt geproduceerd.
- b Leg uit waardoor een elektrische auto toch milieuvriendelijker zou kunnen zijn dan een auto die op fossiele brandstof rijdt. Dé manier om milieuvriendelijk met een elektrische auto te rijden staat in het fragment van een krantenartikel hieronder.

“Leg zonnepanelen op uw dak of plaats een windturbine. Gebruik deze stroom om uw elektrische auto op te laden en u heeft duurzame en honderd procent CO₂-neutrale stroom om op te rijden.”

Bron: *de Volkskrant*, 12 januari 2011

- c Welk commentaar en welke vragen roept deze uitspraak bij je op?

Milieueffecten

Brandstofverbruik zorgt voor **uitputting** van de voorraden brandstof. Eens zal de voorraad steenkool, aardolie en aardgas opraken. Wanneer het zover is, valt niet met zekerheid te zeggen. Er worden nog steeds nieuwe voorraden ontdekt. Bovendien kan ook het brandstofverbruik in de toekomst veranderen. Brandstofverbruik zorgt ook voor **vervuiling** van het milieu. Bij het verbranden van brandstof ontstaan onder andere stikstofoxiden (NO_x) en koolstofdioxide (CO₂). Deze stoffen komen in de lucht terecht. Stikstofoxiden in de lucht veroorzaken zure regen. Dit kan bossen en land- en tuinbouwgewassen aantasten. Koolstofdioxide in de lucht zorgt voor versterking van het broeikaseffect. Hierdoor kan de temperatuur in de atmosfeer van de aarde stijgen. Het gevolg hiervan kan

een stijging van het zeeniveau en een verandering van het klimaat zijn. Of deze effecten inderdaad zullen optreden, is nog onduidelijk.

De bijdrage van het verkeer aan uitputting van de brandstofvoorraad en aan luchtvervuiling hangt onder andere af van de hoeveelheid brandstof die wordt verbruikt. Hoe kleiner het brandstofverbruik is, des te kleiner zijn de milieueffecten.

Menselijk lichaam als motor

Je komt brandstofverbruik niet alleen tegen in het gemotoriseerde verkeer. Ook het menselijk lichaam verbruikt brandstof: voedsel. Door het verbranden van voedsel kan het lichaam arbeid leveren. Bij bewegingen als lopen en fietsen bepalen de geleverde arbeid, het mechanisch vermogen en het rendement van het menselijk lichaam de benodigde inspanning.



Figuur 4 Ook bij fietsen is sprake van brandstofverbruik.

Brandstofverbruik

Het **brandstofverbruik** van een voertuig is de hoeveelheid brandstof die nodig is om een bepaalde afstand (bijvoorbeeld 100 km) af te leggen. Hoe groot dat brandstofverbruik is, hangt af van de eigenschappen van het voertuig (zoals de vorm, afmetingen en massa) en van het rijgedrag van de bestuurder (zoals de snelheid). Deze factoren bepalen de grootte van de tegenwerkende wrijvingskrachten en daarmee de grootte van de benodigde voorwaartse kracht op het voertuig. Want: bij rijden met een constante snelheid is er sprake van krachten-evenwicht. Het brandstofverbruik wordt dan bepaald door de arbeid die de motor moet leveren en door het mechanisch vermogen en het rendement van de motor. Brandstof is een bron van energie. Bij het gebruik ervan wordt deze energie omgezet in andere vormen van energie. Brandstofverbruik in het verkeer is dus ook te zien als een energieomzetting.

Dit hoofdstuk gaat over brandstofverbruik in het verkeer, en de mogelijkheden om dat brandstofverbruik zo laag mogelijk te maken.

Hoofdstukvragen

- Welke invloed hebben de geleverde arbeid, het mechanisch vermogen en het rendement van de motor op het brandstofverbruik van een voertuig?
- Hoe maak je dat brandstofverbruik van een motorvoertuig zo laag mogelijk?

Voorkennis

- 3** In het verkeer zorgen motoren voor een *energieomzetting*. Een motor noemen we daarom een *energieomzetter*.
 - a** Voor welke energieomzetting zorgt een verbrandingsmotor? En een elektromotor?
 - b** Is er bij deze energieomzetter sprake van energieverlies door warmteontwikkeling?
 - c** Hoe is het rendement van een energieomzetter gedefinieerd? In welke eenheid wordt dat rendement opgegeven?
 - d** Hoe is het vermogen van een energieomzetter gedefinieerd? In welke eenheid wordt dat vermogen opgegeven?
- 4** Een voertuig beweegt als gevolg van krachten die erop worden uitgeoefend. Daarbij kan sprake zijn van *krachtenevenwicht*.
 - a** Welke krachten worden op een bewegend voertuig uitgeoefend?
 - b** Hoe groot is de resulterende kracht (of netto-kracht) op het voertuig als er met een constante snelheid wordt gereden?
 - c** Waardoor wordt (dus) de voorwaartse kracht op een voertuig bepaald bij rijden met een constante snelheid?
 - d** De voorwaartse kracht op een voertuig wordt geleverd door de motor. Leg uit waardoor het brandstofverbruik groter is als de voorwaartse kracht op een voertuig groter is.

3.2 Arbeid en brandstofverbruik

Brandstofverbruik in het verkeer heeft te maken met krachten: een kracht van de motor op de wielen van een auto, of een spierkracht op de trappers van een fiets. Zo'n kracht verricht daarbij arbeid, en daarvoor is brandstof nodig.

Paragraafvraag

Welk verband is er tussen kracht, arbeid en brandstofverbruik?

Kracht en arbeid

Het begrip *arbeid* heeft in de natuurkunde een veel beperkter betekenis dan in het gewone taalgebruik. Je kunt op je stoel aan je bureau heel hard werken. Met andere woorden: arbeid leveren. Je kunt proberen een omvallende boekenkast

tegen te houden. Dat kan ook heel wat inspanning kosten. Maar natuurkundig gezien is in die gevallen de geleverde arbeid nul. Natuurkundig gezien lever je wél arbeid als je de trap op klimt, een eind fietst of een plank doorzaagt. In al die gevallen is er sprake van een *kracht*: de spierkracht. Die kracht zorgt voor een *verplaatsing* in de richting van de kracht. Die kracht verricht dan *arbeid*. Die arbeid wordt geleverd door je lichaam. Voor het leveren van die arbeid heeft je lichaam voedsel nodig als energiebron.

De geleverde **arbeid** (symbool: W) hangt af van de grootte van de kracht F : hoe groter deze kracht is, des te groter is de arbeid. De geleverde arbeid hangt ook af van de grootte van de verplaatsing s in de richting van de kracht: hoe groter deze verplaatsing is, des te groter is de arbeid. De geleverde arbeid is dan te berekenen met de volgende formule:

$$W = F \cdot s$$

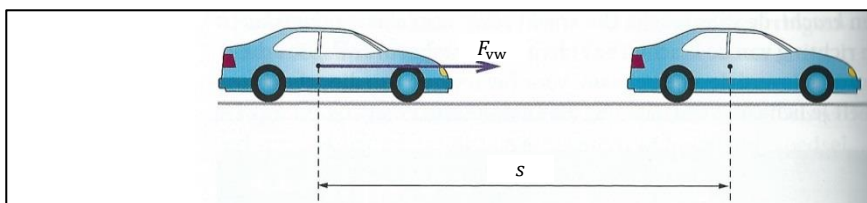
In deze formule is W de arbeid (in Nm of J), F de kracht (in N) en s de verplaatsing (in m).

Deze formule geldt alleen als de kracht en de verplaatsing dezelfde richting hebben. Dus: bij een verplaatsing in de richting van de kracht.

Uit de formule volgt de eenheid van arbeid: *newton-meter* (afgekort: Nm). Deze eenheid is dezelfde als de energie-eenheid joule (afgekort: J): $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$.

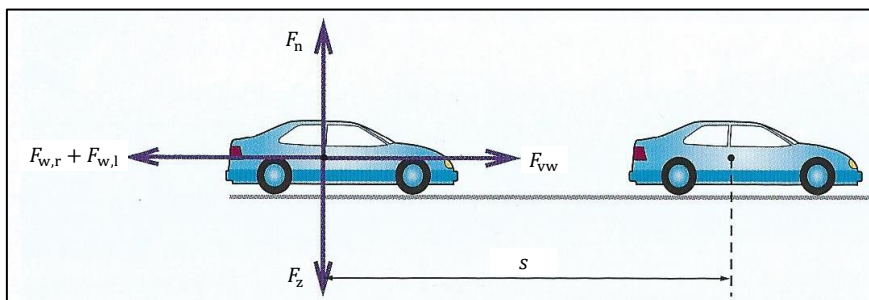
Rijden op een vlakke weg

Bij het rijden op een vlakke (horizontale) weg zorgt de motor voor een voorwaartse kracht F_{vw} op het voertuig zoals in figuur 5. Die kracht verricht arbeid bij een voorwaartse verplaatsing s van het voertuig.



Figuur 5 Arbeid bij autorijden.

Bij een constante snelheid is deze voorwaartse kracht F_{vw} gelijk aan de som van de tegenwerkende rol- en luchtweerstandskracht $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$: $F_{vw} = F_{w,r} + F_{w,l}$. In de horizontale richting is dus sprake van een krachtenevenwicht. Dat geldt ook voor de verticale richting: de zwaartekracht F_z en de normaalkracht F_n op het voertuig zijn even groot.

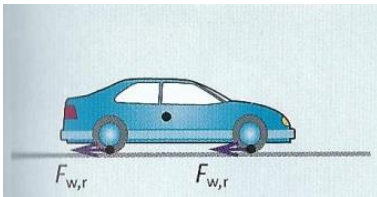


Figuur 6 Krachten op een voertuig als het met een constante snelheid op een horizontale weg rijdt. Voor de duidelijkheid is bij al deze krachten het zwaartepunt van het voertuig als aangrijpingspunt gekozen.

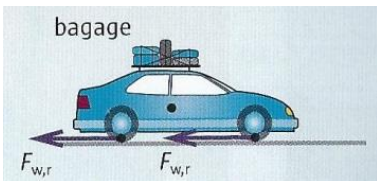
De voorwaartse kracht F_{vw} op het voertuig zorgt voor een verplaatsing s in horizontale richting. Deze voorwaartse kracht verricht dan arbeid: $W = F_{vw} \cdot s$. Bij die beweging verrichten de zwaartekracht F_z en de normaalkracht F_n op het voertuig geen arbeid. Want: het voertuig verplaatst zich niet in verticale richting.

Arbeid en voorwaartse kracht

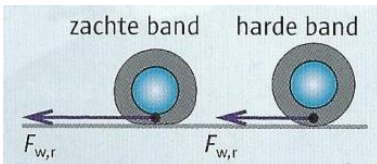
De voorwaartse kracht op het voertuig verricht arbeid: $W = F_{vw} \cdot s$. Hoe kleiner de voorwaartse kracht F_{vw} en de verplaatsing s zijn, des te kleiner is de verrichte arbeid. Om deze arbeid te kunnen leveren, verbruikt de motor brandstof. Het



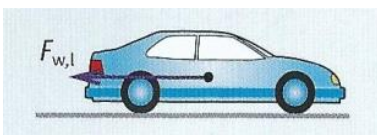
Figuur 7 De rolweerstandskracht $F_{w,r}$ op een rijdend voertuig.



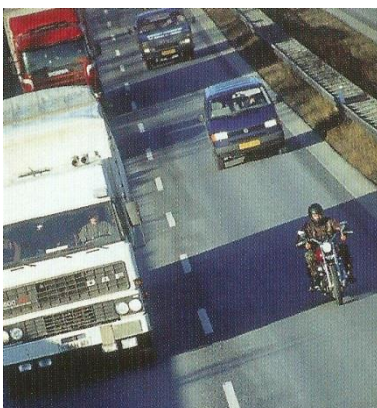
Figuur 8 Een zwaardere auto heeft een hoger brandstofverbruik.



Figuur 9 Een auto met zachtere banden heeft een hoger brandstofverbruik.



Figuur 10 De luchtweerstandskracht $F_{w,l}$ op een rijdend voertuig.



Figuur 11 Door het grotere frontaal oppervlak is het brandstofverbruik van een vrachtauto groter dan dat van een personenauto of motorfiets.

brandstofverbruik hangt dus af van de geleverde arbeid: hoe kleiner de geleverde arbeid is, des te kleiner is het brandstofverbruik.

Het brandstofverbruik van een motorvoertuig is de hoeveelheid brandstof die nodig is om een afstand s van 100 km af te leggen. Dat brandstofverbruik hangt dan af van de grootte van de voorwaartse kracht op het voertuig en dus van de grootte van de tegenwerkende rol- en luchtweerstandskracht. Hoe zorg je voor zo klein mogelijke wrijvingskrachten en daarmee voor een zo laag mogelijk brandstofverbruik?

Rolweerstandskracht

De rolweerstandskracht $F_{w,r}$ op een voertuig hangt af van de massa van het voertuig en van de vervorming van de oppervlakken die elkaar raken. Hoe kleiner de massa en de vervorming zijn, des te kleiner is de rolweerstandskracht. Hoe meer passagiers en/of bagage de auto vervoert, des te groter is dus de rolweerstandskracht. En hoe zachter de banden zijn opgepompt, des te groter is de vervorming en des te groter is dus de rolweerstandskracht. Met andere woorden: de rolweerstandskracht, en dus het brandstofverbruik, hangt af van het gedrag van de bestuurder (de bandenspanning) en de eigenschappen van het voertuig (de massa).

De rolweerstandskracht $F_{w,r}$ op een voertuig wordt gegeven door de volgende formule:

$$F_{w,r} = c_r \cdot F_n$$

In deze formule is $F_{w,r}$ de rolweerstandskracht (in N), c_r de rolweerstandscoefficiënt (zonder eenheid) en F_n de normaalkracht (in N).

In deze formule geeft de normaalkracht F_n de invloed van de massa m . Want: bij het rijden op een horizontale weg is de normaalkracht even groot als de zwaartekracht: $F_n = F_z = m \cdot g$. Hierin is m de massa (in kg) en g de valversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$). De rolweerstandscoefficiënt c_r geeft de invloed van de vervorming (of: de bandenspanning): hoe kleiner de vervorming is, des te kleiner is de c_r -waarde.

Luchtweerstandskracht

De luchtweerstandskracht $F_{w,l}$ op een voertuig hangt af van de snelheid, het frontaal oppervlak en de stroomlijn. Hoe kleiner de snelheid en het frontaal oppervlak zijn en hoe beter de stroomlijn is, des te kleiner is de luchtweerstandskracht. Met andere woorden: de luchtweerstandskracht hangt af van het rijgedrag van de bestuurder (de snelheid) en van de eigenschappen van het voertuig (het frontaal oppervlak en de stroomlijn).



Figuur 12 Een slechtere stroomlijn door een imperiaal op het dak van een auto zorgt voor een hoger brandstofverbruik.



Figuur 13 Een betere stroomlijn door een spoiler op de cabine van een vrachtauto zorgt voor een lager brandstofverbruik.

De luchtweerstandskracht $F_{w,l}$ op een voertuig wordt gegeven door de volgende formule:

$$F_{w,l} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

In deze formule is $F_{w,l}$ de luchtweerstandskracht (in N), c_w de luchtweerstandscoefficiënt (zonder eenheid), A het frontaal oppervlak (in m^2), ρ de dichtheid van de lucht (in kg/m^3), en v de snelheid (in m/s).

In deze formule geeft de luchtweerstandscoefficiënt c_w de invloed van de stroomlijn: hoe beter de stroomlijn is, des te kleiner is de c_w -waarde.

- 5 Het brandstofverbruik van een voertuig hangt af van de arbeid die de motor moet leveren. Die motor zorgt voor een voorwaartse kracht die nodig is om de tegenwerkende rol- en luchtweerstandskracht te compenseren.

9 W Practicum: rol- en luchtweerstandskracht

In deze opdracht onderzoek je met een (model)auto of een fiets de invloed van de massa en de vervorming van de banden of het wegdek op de rolweerstandskracht, en/of de invloed van de snelheid en de stroomlijn op de luchtweerstandskracht.

- a Leg uit dat het brandstofverbruik van een voertuig over een bepaald traject kleiner is naarmate de tegenwerkende krachten kleiner zijn.
 - b Hoe is de tegenwerkende rolweerstandskracht zo klein mogelijk te maken?
 - c Hoe is de tegenwerkende luchtweerstandskracht zo klein mogelijk te maken?
- 6 Als een auto een bepaalde afstand rijdt, verricht de voorwaartse kracht op de auto arbeid.
- a Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als de afstand die de auto aflegt $3 \times$ zo groot is?
 - b Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als deze $3 \times$ zo grote afstand wordt afgelegd met een grotere snelheid, waardoor de voorwaartse kracht op de auto $2 \times$ zo groot is?
- 7 Je legt op de fiets eenzelfde afstand af, eerst met een kleine en daarna met een grotere snelheid. Leg uit of je lichaam tijdens de tweede rit meer, minder of evenveel arbeid verricht, vergeleken met de eerste rit.
- 8 De rolweerstandskracht op een rijdende auto is 120 N. Bij een snelheid van 60 km/h is de luchtweerstandskracht op de auto 480 N.
- a Hoe groot is de voorwaartse kracht op de auto bij een snelheid van 60 km/h?
 - b Hoe groot is de voorwaartse kracht op de auto als de snelheid $2 \times$ zo groot is (120 km/h)?
 - c Hoeveel keer zo groot is het brandstofverbruik van de auto bij deze $2 \times$ zo grote snelheid (120 in plaats van 60 km/h)?

Paragraafvraag

Welk verband is er tussen voorwaartse kracht, arbeid, tijd, snelheid en vermogen?

De mens als motor

Ook het menselijk lichaam kan arbeid verrichten. De per seconde geleverde arbeid (dus: het mechanisch vermogen) kan groot of klein zijn. Hoe groter het mechanisch vermogen is, des te korter kan het lichaam arbeid verrichten. Met andere woorden: des te sneller raakt het lichaam te vermoeid.

Het menselijk lichaam gedurende een langere periode van enkele uren een mechanisch vermogen van zo'n 150 W leveren. Het maximale mechanisch vermogen is zo'n 1500 W, maar dit houdt het lichaam maar korte tijd vol.

3.3 Motorvermogen en snelheid

De voorwaartse kracht op een voertuig verricht arbeid. Daarbij is niet alleen de hoeveelheid arbeid van belang, maar ook de tijd waarin die arbeid moet worden verricht. Als een auto hard rijdt, is een grote voorwaartse kracht nodig en wordt per seconde een grote afstand afgelegd. De motor levert dan in korte tijd veel arbeid. Of, met andere woorden: het vermogen van de motor moet groot zijn.

Arbeid en vermogen

Bij het rijden levert een motor arbeid. Die arbeid wordt geleverd in een bepaalde tijd. Bij een lage snelheid is de voorwaartse kracht op het voertuig klein en wordt per seconde een kleine afstand afgelegd. De arbeid die de motor per seconde levert, is dan klein. Bij een hoge snelheid levert de motor per seconde meer arbeid. Want: de voorwaartse kracht op het voertuig is groter en er wordt per seconde een grotere afstand afgelegd.

De arbeid die de motor per seconde levert, noemen we het **mechanisch vermogen** (symbool: P_m) van de motor:

$$P_m = \frac{W}{t}$$

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), W de geleverde arbeid (in Nm of J) en t de tijdsduur (in s) waarin de arbeid wordt geleverd. Uit de formule volgt de eenheid van mechanisch vermogen: *joule per seconde* (afgekort: J/s). Voor deze eenheid gebruiken we meestal – net als bij het elektrisch vermogen – het kortere woord *watt* (afgekort: W): 1 J/s = 1 W.

Snelheid en vermogen

Een voertuig dat met een constante snelheid v rijdt, legt in een bepaalde tijd t een afstand s af. Voor de constante snelheid van dat voertuig geldt: $v = s/t$. Om een voertuig met een bepaalde (constante) snelheid te laten rijden, moet de motor een bepaald mechanisch vermogen leveren. Het verband tussen dit mechanisch vermogen en de snelheid is af te leiden uit de arbeidsformule: $W = F_{vw} \cdot s$. Voor het mechanisch vermogen P_m geldt dan: $P_m = W/t = F_{vw} \cdot s/t$. Hierin is s de afstand die wordt afgelegd, en t de tijd waarin dat gebeurt. De breuk s/t in de formule is dus niets anders dan de snelheid v . Dit levert de volgende formule voor het mechanisch vermogen:

$$P_m = F_{vw} \cdot v$$

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), F_{vw} de voorwaartse

10 W Practicum: vermogen meten

In deze opdracht meet je het mechanisch vermogen van je eigen lichaam.

grootheid

c_w	1,5
A	$0,80 \text{ m}^2$
ρ	$1,3 \text{ kg/m}^3$

Figuur 14

fietshouding	c_w	$A \text{ (m}^2\text{)}$
rechttopzittend	1,5	0,80
voorovergebogen	1,3	0,50

Figuur 15

Paragraafvraag

Hoe hangt het brandstofverbruik af van de soort brandstof en het rendement van de motor?

kracht (in N) en v de snelheid (in m/s).

- 11** Voor het mechanisch vermogen P_m van de motor van een voertuig geldt: $P_m = F_{vw} \cdot v$. Hierin is F_{vw} de voorwaartse kracht en v de snelheid van het voertuig. Leg uit dat dan bij een $2 \times$ zo grote snelheid het mechanisch vermogen méér dan $2 \times$ zo groot moet zijn.
- 12** Als we de rolweerstandskracht op een voertuig verwaarlozen, werkt er nog maar één tegenwerkende kracht op een rijdend voertuig: de luchtweerstandskracht.
- a** Laat zien dat het mechanisch vermogen P_m van de motor dan gegeven wordt door: $P_m = k \cdot v^3$. Hierin is k een evenredigheidsconstante.
- b** Van welke grootheden hangt de evenredigheidsconstante k af? Welke invloed heeft elk van die grootheden op de waarde van k ?
- 13** Voor de totale tegenwerkende kracht F_w (in N) op een rijdende auto geldt: $F_w = 243 + 0,53 \cdot v^2$. Hierin is v de snelheid (in m/s).
- a** Bereken het mechanisch vermogen van de motor bij de volgende vier snelheden: 54, 72, 108 en 162 km/h.
- b** Teken in een P_m, v -diagram het verband tussen het mechanisch vermogen van de motor en de snelheid.
- c** De automotor heeft een maximaal mechanisch vermogen van 46,8 kW. Bepaal de topsnelheid van deze auto.
- 14** Het menselijk lichaam kan gedurende enkele uren een mechanisch vermogen van 150 W leveren. In deze opgave maak je een schatting van de fietssnelheid die dat oplevert. Gebruik de gegevens in de tabel van figuur 14, en verwaarloos de rolweerstandskracht.
- a** Stel een formule op voor de voorwaartse kracht F_{vw} op de fiets, waarin alleen nog de snelheid v als onbekende voorkomt.
- b** Bereken de fietssnelheid bij een mechanisch vermogen van 150 W.
- c** Leg uit waardoor deze snelheid in de praktijk lager zal uitkomen dan wat je in vraag b hebt berekend.
- 15** Het door het menselijk lichaam geleverde mechanisch vermogen bij het fietsen hangt van de fietshouding: rechttopzittend of voorovergebogen. Gebruik de gegevens in de tabel van figuur 15, en verwaarloos de rolweerstandskracht.
- Bereken met hoeveel procent het mechanisch vermogen dat je lichaam moet leveren afneemt als de fietshouding verandert van rechttopzittend naar voorovergebogen (bij dezelfde snelheid).

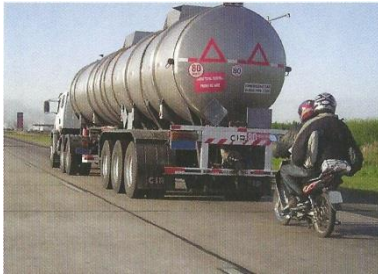
3.4 Motorrendement

Voor het leveren van arbeid is *energie* nodig. Die energie ligt opgeslagen in de brandstof: benzine, dieselolie en lpg. Bij het verbranden van die brandstof levert de motor niet alleen arbeid, maar ook *warmte*. Die warmte wordt afgegeven aan de omgeving en gaat daarmee verloren. Met andere woorden: de motor zet energie (opgeslagen in de brandstof) met een bepaald *rendement* om in arbeid.

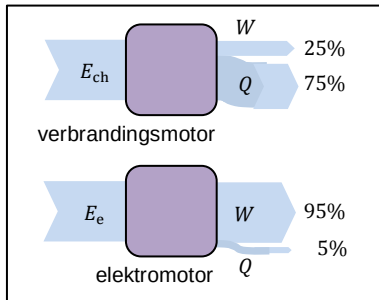
Chemische energie

Om arbeid te leveren, verbruikt de motor energie. Bij een verbrandingsmotor zit die energie opgeslagen in brandstof: **chemische energie**. Bij het verbranden van brandstof komt die chemische energie vrij in de vorm van **warmte**. Met andere woorden: de motor zet chemische energie om in warmte. Die warmte wordt gebruikt om de motor te laten draaien. Dus: om de motor arbeid te laten leveren. De **verbrandingswarmte** (symbool: τ_v) geeft aan hoeveel energie er vrijkomt bij het verbranden van 1 m^3 brandstof. De waarde van de verbrandingswarmte hangt af van de soort brandstof: benzine, dieselolie, lpg enzovoort. Zo is de verbrandingswarmte van benzine $33 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$. Of, in de eenheid joule per liter: $33 \cdot 10^6 \text{ J/L}$.

Bij het verbranden van een hoeveelheid brandstof komt dus chemische energie



Figuur 16 In een brandstof ligt chemische energie opgeslagen.



Figuur 17 Energie-stroomdiagram van een verbrandingsmotor (boven) en van een elektromotor (onder).

De mens als energieomzetter

Ook het menselijk lichaam is een energieomzetter: chemische energie (uit voedsel) wordt omgezet in arbeid en warmte. De spieren verrichten arbeid bij lopen, fietsen, tillen enzovoort.

Het rendement van het menselijk lichaam hangt af van de soort activiteit. Fietsen is de meest efficiënte manier van voortbewegen, met een rendement van zo'n 0,25 (of 25%). Bij hardlopen en schaatsen is het rendement van het lichaam lager. Dat komt doordat bij deze manieren van voortbewegen een groter deel van het mechanisch vermogen nodig is voor de slingerbeweging van de benen, bij hardlopen nog meer dan bij schaatsen.

vrij. De hoeveelheid vrijkomende chemische energie (symbool: E_{ch}) hangt af van de verbrandingswarmte en van het volume van de brandstof:

$$E_{ch} = r_v \cdot V$$

In deze formule is E_{ch} de chemische energie (in J), r_v de verbrandingswarmte (in J/m³ of J/L) en V het volume (in m³ of L) van de brandstof.

Energiebehoud

In een verbrandingsmotor wordt slechts een deel van de chemische energie (opgeslagen in de brandstof) omgezet in arbeid. De rest van de vrijkomende energie wordt in de vorm van warmte via het koelwater en de uitlaat afgevoerd naar de omgeving: de lucht rond of in het voertuig. Dus: een verbrandingsmotor zet chemische energie om in arbeid en warmte. Deze energieomzetting is afgekort te schrijven als: $E_{ch} \rightarrow W + Q$.

Voor een elektromotor geldt iets dergelijks: een elektromotor zet elektrische energie om in arbeid en warmte. Afgekort: $E_e \rightarrow W + Q$.

Beide energieomzettingen zijn weergegeven in de energie-stroomdiagrammen van figuur 17.

Een motor is een *energieomzetter*: er gaat (chemische of elektrische) energie in en er komt energie uit (in de vorm van arbeid en warmte). Bij elke energieomzetting is de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *in* gaat even groot als de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *uit* komt. Met andere woorden: bij elke energieomzetting blijft de totale hoeveelheid energie *behouden*. Dit noemen we de **wet van behoud van energie**. In de vorm van een formule is deze wet te schrijven als:

$$E_{tot,in} = E_{tot,uit}$$

In deze formule zijn $E_{tot,in}$ en $E_{tot,uit}$ de totale hoeveelheid energie (in J) die de energieomzetter in gaat en uit komt.

Maar bij elke energieomzetting wordt slechts *een deel* van de toegevoerde energie omgezet in een nuttige (of gewenste) energiesoort. De rest gaat verloren in de vorm van warmte. Die warmte – waar we niets mee doen – zouden we **afvalwarmte** kunnen noemen.

Rendement

Het **rendement** (symbool: η) van een energieomzetter geeft aan welk deel van de omgezette energie wordt geleverd in de vorm van nuttige (of gewenste) energie. Voor een motor is de nuttige (of gewenste) energie de door de voorwaartse kracht verrichte arbeid W :

$$\eta = \frac{E_{nuttig}}{E_{in}} = \frac{W}{E_{in}}$$

In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), E_{nuttig} de geleverde nuttige energie (in J) en E_{in} de omgezette (chemische of elektrische) energie (in J).

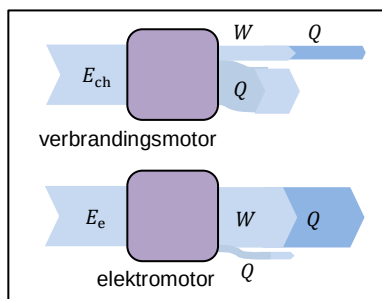
In deze formule mag je de energie E ook vervangen door het vermogen P . Want: het gaat om de nuttige en omgezette energie in dezelfde tijdsduur. Bij een tijdsduur van 1 s is deze energie gelijk aan het vermogen. Voor een motor is het nuttige (of gewenste) vermogen het mechanisch vermogen P_m :

$$\eta = \frac{P_{nuttig}}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_{in}}$$

In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), P_{nuttig} het geleverde nuttige vermogen (in W) en P_{in} het omgezette (chemische of elektrische) vermogen (in W).

Het rendement kan worden opgegeven als getal of in de vorm van een percentage. Met de twee formules hierboven bereken je het rendement in de vorm van een getal. Met als resultaat bijvoorbeeld een rendement van 0,20. Dit is dan ook op te geven in de vorm van een percentage: een rendement van $0,20 \cdot 100\% = 20\%$.

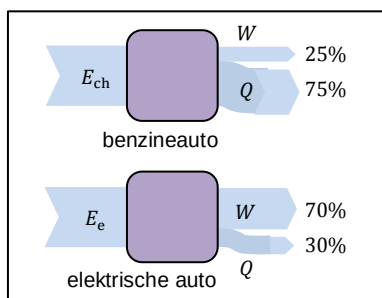
In de energie-stroomdiagrammen van figuur 17 zie je dat de geleverde arbeid W kleiner is dan de omgezette (chemische of elektrische) energie E_{in} . Het rendement η van een motor is daardoor kleiner dan 1 (of 100%).



Figuur 18 Alle door een verbrandings- of elektromotor verbruikte chemische of elektrische energie wordt uiteindelijk omgezet in warmte.

16 W Practicum: rendement meten

In deze opdracht meet je het rendement van een elektromotor.



Figuur 19 Energie-stroomdiagram van een benzineauto (boven) en van een elektrische auto (onder).

v (km/h)	F_w (N)
60	$3,6 \cdot 10^2$
100	$6,8 \cdot 10^2$
120	$9,0 \cdot 10^2$

Figuur 20

Wrijvingsarbeid

Een verbrandingsmotor zet chemische energie om in door de voorwaartse kracht verrichte arbeid. Bij het rijden met constante snelheid is er echter ook sprake van een even grote tegenwerkende wrijvingskracht (de som van de rol- en luchtweerstandskracht). Ook die tegenwerkende wrijvingskracht verricht arbeid, en wel precies evenveel als de voorwaartse kracht. Deze arbeid van de tegenwerkende wrijvingskracht noemen we **wrijvingsarbeid**. Daardoor wordt uiteindelijk alle verbruikte chemische energie omgezet in warmte, zoals weergegeven in figuur 18. Daardoor stijgen bij het rijden de lucht, het wegdek, de banden enzovoort iets in temperatuur.

Rendement en brandstofverbruik

Het brandstofverbruik van een voertuig hangt af van de arbeid die de motor moet leveren, maar ook van het rendement van de motor. Voor de geleverde arbeid geldt: $W = F_{vw} \cdot s$. Voor het rendement geldt: $\eta = W/E_{in}$. Het combineren van deze twee formules geeft de volgende formule voor de omgezette energie:

$$E_{in} = \frac{W}{\eta} = \frac{F_{vw} \cdot s}{\eta}$$

Uit deze formule volgt dat bij het afleggen van een bepaalde afstand s de omgezette energie (en dus het brandstofverbruik) afhangt van de voorwaartse kracht F_{vw} op het voertuig en van het rendement η van de motor. Een laag brandstofverbruik ontstaat dus door te zorgen voor een kleine voorwaartse kracht (en dus: een kleine rol- en luchtweerstandskracht op het voertuig) en een hoog rendement van de motor.

- 17 Leg uit waardoor het rendement van een motor altijd kleiner is dan 1 (of 100%).
- 18 In figuur 19 zie je het energie-stroomdiagram van een benzineauto en een elektrische auto. Het gegeven rendement van deze voertuigen is een redelijk gemiddelde schatting, maar hangt in de praktijk bij vooral de elektrische auto af van de gebruikte techniek voor onder andere de manier van elektriciteitsvoorziening en -opslag.
 - a Voor welke energieomzetting zorgt de motor in elk van de twee auto's?
 - b Bij welke soort auto is het rendement van de energieomzetting het grootst: bij de benzineauto of bij de elektrische auto?

De elektrische energie die de elektromotor omzet, is geproduceerd in een elektriciteitscentrale. Zo'n centrale zet chemische energie in brandstof (steenkool) met een rendement van 40% om in elektrische energie. Overigens kan een moderne aardgasgestookte centrale een hoger rendement hebben (tot zo'n 60%).
 - c Teken het energie-stroomdiagram van de omzetting van chemische energie in de steenkoolgestookte centrale via elektrische energie naar arbeid door de motor in een elektrische auto.
 - d Hoe groot is het rendement van de energieomzetting in de elektriciteitscentrale en in de elektrische auto samen?
 - e Geef commentaar op de volgende uitspraak: "Het rendement van een elektrische auto is veel hoger dan het rendement van een benzineauto."
- 19 Om het brandstofverbruik van een voertuig te berekenen, wordt de volgende formule gebruikt: $E_{in} = F_{vw} \cdot s / \eta$.
 - a Deze formule lijkt erop te wijzen dat het brandstofverbruik niet afhangt van de snelheid. Is dit inderdaad zo? Leg uit waarom wel of niet.
 - b Geef zo volledig mogelijk aan welke grootheden het brandstofverbruik bepalen, en welk verband er is tussen elk van die grootheden en het brandstofverbruik.

- 20 Bij een onderzoek naar het brandstofverbruik van een nieuw automodel is bij verschillende waarden van de snelheid v de grootte van de totale wrijvingskracht F_w op de auto gemeten. De meetresultaten staan in de tabel van figuur 20. De auto heeft een benzinemotor met een rendement van 0,25 (of 25%).
 - a Bereken bij elk van de drie snelheden de hoeveelheid chemische energie die

- de motor verbruikt bij het afleggen van een afstand van 100 km.
- b** Bereken bij elk van de drie snelheden het brandstofverbruik van de auto.
- c** Hoeveel keer zo groot wordt dit brandstofverbruik (ongeveer) als de snelheid verdubbelt (van 60 naar 120 km/h)?
- 21** Het rendement van het menselijk lichaam hangt af van de soort activiteit. Fietsen is de meest efficiënte manier van voortbewegen. Voor normaal fietsen met een snelheid van 25 km/h moet het lichaam een mechanisch vermogen van zo'n 125 W leveren. Het door het lichaam omgezette vermogen is daarbij zo'n 625 W. Bereken het rendement van het menselijk lichaam bij deze manier van voortbewegen.

3.5 Afsluiting

Samenvatting

De inhoud van dit hoofdstuk over brandstofverbruik in het verkeer is als volgt samen te vatten.

- Brandstofverbruik in het verkeer heeft uitputting (van brandstofvoorraden) en vervuiling (van lucht) als milieueffecten.
- Voor het rijden met een constante snelheid is een voorwaartse kracht op het voertuig nodig. Die voorwaartse kracht verricht arbeid. Hoe groter de voorwaartse kracht en de verplaatsing zijn, des te groter is de verrichte arbeid.
- Bij het rijden met een constante snelheid is de voorwaartse kracht even groot als de totale tegenwerkende wrijvingskracht (rol- en luchtweerstandskracht).
- Het mechanisch vermogen van een motor is de door de voorwaartse kracht per seconde verrichte arbeid. Hoe groter de voorwaartse kracht en de snelheid zijn, des te groter is het mechanisch vermogen.
- Bij elke energieomzetting geldt de wet van behoud van energie: de totale energie die een energieomzetter in gaat is gelijk aan de totale energie die de energieomzetter uit komt.
- Bij elke energieomzetting ontstaat afvalwarmte, waardoor het rendement van een energieomzetter zoals een verbrandingsmotor of een elektromotor altijd kleiner dan 1 (of 100%) is: de geleverde nuttige energie is kleiner dan de omgezette energie.
- Bij het rijden met een constante snelheid verricht de totale tegenwerkende wrijvingskracht wrijvingsarbeid, waardoor uiteindelijk alle door de motor omgezette energie wordt omgezet in warmte.
- Het brandstofverbruik (in L/100 km) van een voertuig bij het rijden met een constante snelheid hangt af van de voorwaartse kracht (en dus van onder andere de snelheid) en het motorrendement.

- 22** Maak een overzicht van de formules die bij brandstofverbruik in het verkeer een rol spelen. Geef bij elk symbool in die formules aan welke grootheid dat symbool voorstelt, en wat de bijbehorende eenheid is.

- 23** Maak een begrippenweb over brandstofverbruik in het verkeer waarin je laat zien welke verbanden er zijn tussen de verschillende grootheden uit de samenvatting hierboven. Vul het begrippenweb waar mogelijk aan met de formules voor het verband tussen de verschillende grootheden uit opdracht 22.

- 24** Kijk terug naar je antwoorden bij opdracht 1 en 2 van dit hoofdstuk. Bij welke vragen in die opdrachten zou je nu een ander antwoord geven? En welk ander antwoord is dat dan? (Zie zo nodig ook de eindopgaven 25 en 26.)



Figuur 21 Een lagere maximum-snelheid betekent minder brandstofverbruik in het verkeer.

Eindopgaven

- 25** Om de milieueffecten van het verkeer te beperken is onder andere voorgesteld om de maximumsnelheid van 130 km/h op autosnelwegen (weer) terug te brengen tot 100 km/h. In deze opgave ga je na hoeveel daardoor het



Figuur 22 Zonnepanelen zetten stralingsenergie van de zon om in elektrische energie.

brandstofverbruik afneemt.

Een personenauto heeft (leeg) een massa van 800 kg. De rolweerstandskracht wordt gegeven door: $F_{w,r} = 0,015 \cdot F_n$. De luchtweerstandskracht op de redelijk gestroomlijnde auto wordt gegeven door: $F_{w,l} = 0,45 \cdot v^2$. Het rendement van de benzinemotor is 0,25 (of 25%).

- a Bereken het brandstofverbruik (in L/100 km) bij een snelheid van 130 en 100 km/h.
- b Wat is je conclusie: met hoeveel procent neemt het brandstofverbruik af door een lagere maximumsnelheid (100 in plaats van 130 km/h)?

- 26 Een elektrische auto wordt pas echt “schoon” als de benodigde elektrische energie wordt geproduceerd met duurzame energiebronnen als zon en wind. De opbrengst aan elektrische energie van zes zonnepanelen op het dak van een woning is 1200 kWh per jaar.

- a Bereken de jaarproductie van elektrische energie in J.

De door de zonnepanelen geproduceerde elektrische energie wordt via opslag in accu's volledig gebruikt voor de aandrijving van een elektrische auto. De auto heeft (leeg) een massa van 800 kg. De rolweerstandskracht wordt gegeven door: $F_{w,r} = 0,015 \cdot F_n$. De luchtweerstandskracht op de redelijk gestroomlijnde auto wordt gegeven door: $F_{w,l} = 0,45 \cdot v^2$. Het rendement van de elektrische auto is 0,70 (of 70%).

- b Bereken de afstand die de auto met een snelheid van 100 km/h kan afleggen op de door de zonnepanelen geleverde elektrische energie.
- c Wat is je conclusie: is het aantal zonnepanelen groot genoeg voor het afleggen van een afstand van (bijvoorbeeld) 12.000 km per jaar? En zo nee: welke maatregelen zou de automobilist/bewoner kunnen nemen om de per jaar af te leggen afstand groter te maken?

- 27 Lees het artikel hieronder over een nieuw wereldrecord voor de afgelegde afstand op één liter benzine.

1 op 3.789 kilometer

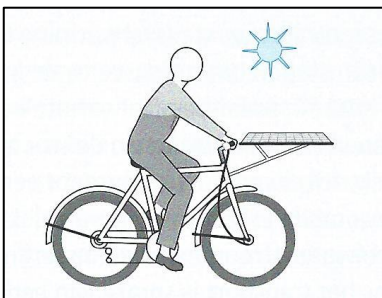
Het zuinigheidswereldrecord is gebroken. Op de Shell Eco-marathon in het Britse Rockingham slaagden studenten erin om met één liter benzine 3789 kilometer en 520 meter af te leggen. Met een extreem gestroomlijnd voertuig en op speciale banden met een ultralage rolweerstand werd het record gevestigd. Het oude record stond op 1 op 3625.

Bron: *Utrechts Nieuwsblad*

Om dit wereldrecord te vestigen heeft het team zijn uiterste best moeten doen om de rol- en luchtweerstand van hun voertuig zo laag mogelijk te houden, en het motorrendement zo hoog mogelijk te maken. De rolweerstandskracht op het voertuig is slechts 2,0 N. Verder heeft het voertuig een extreem lage c_w -waarde van 0,12 en een frontaal oppervlak A van 0,80 m². Tijdens de test moest het voertuig een minimale snelheid aanhouden van 15 mijl per uur (wat overeenkomt met 24 km/h) bij een luchtdichtheid ρ van 1,27 kg/m³.

Bereken het rendement van de motor in dit voertuig.

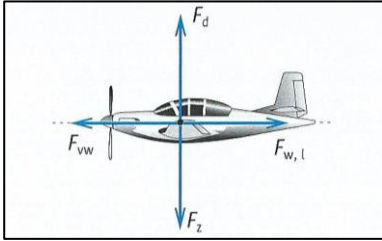
- 28 De fiets in figuur 23 is voorzien van een zonnepaneel. De zonnecellen op dat paneel zetten de invallende stralingsenergie van de zon om in elektrische energie. Een elektromotor zorgt vervolgens voor de aandrijving. In de tabel van figuur 24 staan enkele technische gegevens van deze zonn fiets. Ga met een berekening na of deze fiets op een zonnige dag inderdaad – zoals in het onderschrift van figuur 23 staat – een snelheid van 13 km/h haalt zonder de accu te gebruiken.



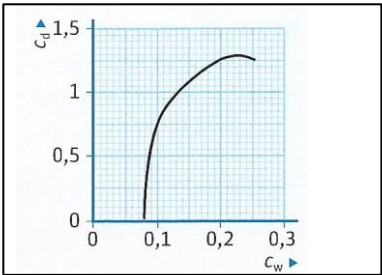
Figuur 23 Fietsen op zonne-energie. Als de accu door het zonnepaneel is volgeladen, kan deze fiets een afstand van bijna 50 km afleggen. Schijnt onderweg de zon, dan haalt de fiets een snelheid van 13 km/h zonder de accu te gebruiken.

stralingsintensiteit (op een zonnige dag)	I	500 W/m ²
oppervlakte zonnepaneel	A	0,70 m ²
rendement zonnepaneel	η_{zp}	0,10 (of 10%)
rendement elektromotor en overbrenging	η_{em}	0,50 (of 50%)
totale wrijvingskracht (bij een snelheid van 13 km/h)	F_w	5 N

Figuur 24



Figuur 25 De vier krachten op het vliegtuig.



Figuur 26 Het verband tussen de liftcoëfficiënt c_d en de luchtweerstandcoëfficiënt c_w .

29 Een motorvliegtuig vliegt met een constante snelheid op een constante hoogte. Op dit vliegtuig worden de volgende krachten uitgeoefend: de zwaartekracht F_z , de voorwaartse kracht F_{vw} , de liftkracht F_d en de luchtweerstandskracht $F_{w,l}$ (zie figuur 25). De liftkracht en de luchtweerstandskracht worden gegeven door: $F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$ en $F_{w,l} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$. In beide formules is A de totale vleugeloppervlakte (in m^2), ρ de dichtheid (in kg/m^3) van de lucht en v de vliegsnelheid (in m/s). De liftkracht en de luchtweerstandskracht op een vliegtuig houden verband met elkaar. In figuur 26 is voor dit vliegtuig het verband tussen c_d en c_w gegeven. In de tabel van figuur 27 staan enkele andere gegevens van dit vliegtuig. Bereken het brandstofverbruik van dit vliegtuig op deze vlucht.

massa	m	540 kg
luchtdichtheid op vlieghoogte	ρ	1,18 kg/m^3
liftcoëfficiënt	c_d	0,800
vleugeloppervlakte	A	10,2 m^2
motorrendement	η	0,22
motorbrandstof		benzine

Figuur 27