

## Het gebruik van energie in verkeer en vervoer te land

**Citation for published version (APA):**

Koumans, W. A., & Oudendal, F. (1983). Het gebruik van energie in verkeer en vervoer te land. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. A*, A49(3/4), 121-125.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1983

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Het gebruik van energie in verkeer en vervoer te land

W.A. Koumans en F. Oudendal

De mens heeft een inherente behoefte om zich te kunnen verplaatsen en het vervoer van goederen is een onmisbaar onderdeel van de menselijke samenleving. Beide behoeften nemen sterk toe in de moderne maatschappij: wij wonen verder van ons werk, gaan verder weg met vakantie en vervoeren onze goederen over steeds grotere afstanden. Door de geografische spreiding van de produktie, bijvoorbeeld door de economische specialisatie in EG-verband, neemt de omvang van het goederenvervoer sterker toe dan de industriële produktie.

In dit artikel wordt gekeken naar de prijs die wij voor ons verkeer en vervoer moeten betalen in de vorm van energiegebruik, naar de verbeteringen in onze voertuigen die geleid hebben tot een duidelijk merkbare vermindering van dit verbruik, en naar wenselijke veranderingen in onze keuze van vervoerswijze indien wij werkelijk energie willen besparen. Sommige oplossingen zijn inmiddels 'uitontwikkeld', andere staan nog aan het begin.

Het brandstofverbruik van het wegverkeer in Nederland bedroeg volgens het C.B.S. (Centraal Bureau voor de Statistiek) in 1978 262 PJ, waarvan 188 PJ door personenauto's, 62 PJ door het goederenvervoer, 8 PJ door openbaar vervoer en 4 PJ door diversen ( $1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ Joule} = 2,78 \times 10^8 \text{ kWh}$ ).

Voor personenauto's en goederenvervoer betekent dit in volgorde 7,0 en 2,3 procent van het binnenlandse energiegebruik in dat jaar, ter grootte van 2695 PJ. Dit is een klein aandeel in verhouding tot het huishoudelijke en het industriële energiegebruik, maar het berust vrijwel geheel op de toepassing van aan aardolie ontleende brandstoffen. Deze leverden in hetzelfde jaar 1044 PJ van het binnenlandse energiegebruik. Van deze energiedrager wordt dus 18,0 respectievelijk 5,9 procent verbruikt door personenauto's en goederenvervoer. In deze berekeningen zijn de raffinage-, transport- en opslagverliezen van de brandstoffen meegerekend.

Bij het beoordelen van vervoerssystemen of -middelen wordt de 'vervoersprestatie' uitgedrukt in 'reizigerkilometers' (rkm) voor personenvervoer en 'tonkilometers' (tonkm) bij vrachtvervoer. Men rekent daarbij met de hoeveelheid energie die de voor de geleverde vervoersprestatie verbruikte hoeveelheid brandstof in ruwe vorm (aardolie) bevatte, voordat daar een deel van verloren ging in raffinage, opslag en distributie.

Kenmerkende waarden voor het wegvervoer zijn dan bij de personenauto 1,8 MJ/rkm als gemiddelde voor het Nederlandse wagenpark in 1975 met de gemiddelde bezetting van twee personen (volgens het C.B.S.), maar 2,7 MJ/rkm in het spitsuurverkeer, door de lagere bezettingsgraad en de ongunstige rij-omstandigheden. Van het Nederlandse vracht-autopark was het gemiddelde energiege-

bruik toen 1,7 MJ/tonkm; voor de grote trekker-oplegger- of trekker-aanhangercombinaties ligt het ongeveer een derde lager. Zoals late zal blijken, zijn railvervoermiddelen in energetisch opzicht veel gunstiger.

Toen in 1973 de eindige beschikbaarheid van onze brandstofvoorraden algemeen duidelijk werd, stond de techniek al enige tijd vrijwel stil op het gebied van het energiegebruik per rkm of tonkm. Een uitzondering vormde de auto-industrie in de USA, die juist toen moest voldoen aan de onder politieke druk tot stand gekomen eisen van de Environmental Protection Agency. Aan de grenzen die gesteld werden voor de uitwerp door personenauto's van koolmonoxide en onverbrande koolwaterstoffen, is te voldoen met een chemisch juist brandstof-luchtmengsel. Daardoor werd echter de vlam heter, zodat meer stikstofoxiden worden gevormd. Om dit te voorkomen, koos men voor te 'rijke' brandstof-luchtmengsels. Deze leidden tot een koelere vlam, dus minder stikstofoxiden, maar tevens tot extra koolmonoxide en onverbrande koolwaterstoffen. Om die te oxideren, moesten katalytische naverbranders en reactoren worden gebruikt. Het gevolg was een toename van het brandstofverbruik van Amerikaanse auto's met 15 tot 30%!

In de laatste tien jaren heeft de personenauto een merkwaardige vooruitgang geboekt. Was het in 1973 heel normaal dat een kleine personenauto een gemiddeld brandstofverbruik had van 8 à 9 liter per 100 km ('een op twaalf', zegt de gebruiker dan), momenteel zijn er kleine auto's die comfortabeler, geruislozer en sneller zijn en een verbruik hebben van 5,5 à 6,0 liter per 100 km. In relatieve zin is de vooruitgang bij grote typen in de USA en Europa nog opvallender. Het is interessant om na te gaan hoe deze resultaten werden bereikt.

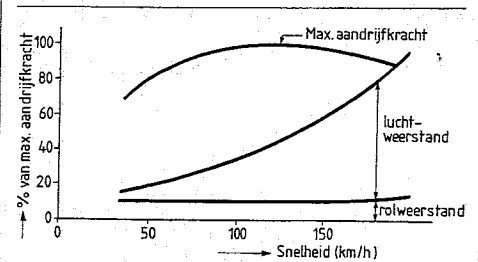


Fig. 1. De lucht- en de rolweerstand van een grote personenauto als functie van de snelheid, vergeleken met de maximale aandrijfkracht. (Ontleend aan H.J. Förster, *Strasse und Autobahn 2*, 1980.)

De totale rijweerstand van een auto is de som van de rolweerstand van zijn banden op de weg, van de luchtweerstand van zijn carrosserie en eventueel van de kracht die nodig is om de auto te versnellen; zie fig. 1. In Nederland is het verantwoord de kracht die nodig is om een voertuig op een hellende weg omhoog te bewegen, te verwaarlozen.

De rolweerstand is het produkt van het gewicht van de auto (dus evenredig met de massa) en de rolweerstandsfactor van de band. Hij is dus vrijwel onafhankelijk van de rijsnelheid. De luchtweerstand is evenredig met het 'frontale oppervlak' (de som van de oppervlakten van de grootste dwarsdoorsnede van de auto en van de wielen), met de luchtweerstandsfactor (die afhankelijk is van het stromingsverloop van de lucht om de auto heen, dus van de vorm van de carrosserie) en met het kwadraat van de rijsnelheid. Bij 50 km/h zijn de rol- en de luchtweerstand van dezelfde grootte, bij de topsnelheid is de luchtweerstand vier tot vijf maal zo groot. De versnellingskracht is uiteraard het produkt van massa en versnelling.

Het ligt voor de hand dat kleine, lichte voertuigen met een lage rol- en luchtweerstand minder vermogen nodig hebben dan een groot voertuig. Maar de spectaculaire verbetering van de zuinigheid bij sommige moderne autotypen berust niet alleen op het feit dat zij wat lichter zijn dan hun voorgangers. Wij zullen nagaan hoe de diverse weerstanden te beïnvloeden zijn.

Sinds de invoering van de radiaalband, waarin de vormstijfheid van het loopvlak niet meer wordt verkregen door het diagonaal, kruislings over elkaar leggen van de koordlagen die de band zijn sterkte geven, maar door het aanbrengen van een stijve gordel van staal- of kunststofdraad tussen de koordlagen en het rubber van het loopvlak, is de rolweerstandsfactor van autobanden sterk verminderd. Een verdere daling zou alleen te bereiken zijn door het loopvlak te maken van een rubbersoort met lage hysteresis (inwendige demping). Dit gaat ten koste van de wrijvingskracht die de band op de weg kan uitoefenen voor het aandrijven, sturen en



Prof. ir. W.A. Koumans werd in 1927 te Delft geboren. Na zijn studie werktuigbouwkunde aan de T.H. Delft werd hij door de Koninklijke Marine gedetacheerd bij het IWECO-TNO te Delft, waar hij nadien nog enkele jaren bleef. Hij werkte daarna vier jaar bij een Frans ingenieursbureau dat vleugelboten ontwierp, en drie jaar als chef research en ontwikkeling bij de schokdemperfabriek KONI te Oud-Beijerland.

Van 1964 tot 1972 was hij hoofd-ingenieur, later ook belast met de commerciële leiding, bij de N.V. Machinefabriek Stork-Jaffa te Utrecht. In 1972 volgde zijn benoeming tot gewoon hoogleraar Vervoerstechniek aan de T.H. Eindhoven. In 1982 werd hij lid van de Raad van Bestuur van T.N.O.

remmen van de auto. Voorlopig moeten wij daarom blijven rekenen op een rolweerstandsfactor van circa 0,012.

Bij de luchtweerstand is het anders. De frontale oppervlakte van een kleine auto kan niet veel kleiner worden dan bij de huidige lichte voertuigen, omdat inzittenden van normale afmetingen er anders niet meer in een aanvaardbare houding in kunnen zitten met behoud van voldoende hoofd- en armruimte. De doorbraak is hier bereikt door het ontwikkelen van nieuwe carrossievormen die in esthetisch opzicht nog aanvaardbaar lijken te zijn voor het publiek en die mede dank zij minutieus detailwerk (glad aansluitende ramen, verzonken ruitewissers en deurgrepen, aansluitende schildbumpers, schortjes ('spoilers') aan voor- en soms achterzijde, sterk achterover hellende voorruit met vloeiende afrondingen en dergelijke) luchtweerstandsfactoren van circa 0,30 voor grote tot 0,35 voor kleine auto's hebben. Normale waarden van 10 jaar geleden waren 0,4 tot 0,5 voor goed geprofileerde auto's; de vooruitgang is hier wezenlijk.

Nog verklaart dit niet ten volle de lage verbruikscijfers van de moderne ontwerpen. Deze zijn mede te danken aan verbeteringen aan de motoren, die nu met 'arme' brandstof-luchtmengsels draaien en daardoor zonder katalytische naverbranders en dergelijke aan de Europese en de meeste Amerikaanse milieu-eisen voldoen. Dank zij de krachtige, elektronische ontstekingsystemen die thans kunnen worden toegepast, is het mogelijk deze mengsels met een lucht-overmaat – het middel tegen vorming van  $\text{NO}_x$  – betrouwbaar tot ontsteking te brengen.

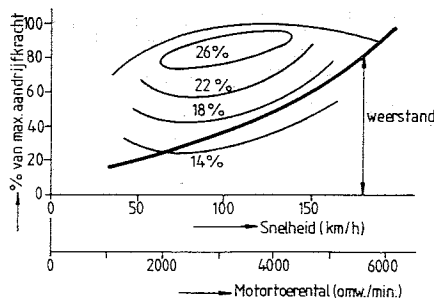
Wijzigingen in de vorm van de verbrandingskamer zorgen er daarbij voor dat de wat langzamer voortschrijdende vlam in deze arme mengsels wordt gecompenseerd door een intensieve werveling van de brandende gassen. Het resultaat is een thermisch rendement van sommige benzinemotoren waar een middelmatige dieselmotor van 10 jaar geleden zich niet voor zou schamen. Ook een betere beheersing van het verbrandingsproces in dieselmotoren leidde tot soortgelijke verbeteringen van 10, soms bijna 20 procent.

Wellicht de belangrijkste factor is echter de wijziging van de overbrengingsverhouding. Tot voor kort werd de vertraging in de transmissie tussen de motor en de aangedreven wielen zo gekozen dat de motor bij de topsnelheid van de auto wat sneller draait dan het toerental waarbij hij het grootste vermogen kan afgeven. Het gevolg is dat bij alle lagere snelheden een flink vermogenoverschot beschikbaar is, zonder dat naar een lagere versnelling hoeft te worden teruggeschakeld. Het bezwaar is dat bij alle normale rijsnelheden de motor met onnodig hoge draaisnelheid en een klein koppel functioneert. Dit zijn omstandigheden, waarbij het rendement van de motor laag is; zie fig. 2.

Kiest men nu de overbrengingsverhoudingen zo dat de motor minder snel draait, dan daalt het toerental bij elke rijsnelheid overeenkomstig, maar ook de aandrijfkraft die de auto bij een gegeven motor-koppel ondervindt, wordt evenredig kleiner! Bij een vertraging van bijvoorbeeld 4 : 1 tussen motor en aangedreven wiel wordt immers het koppel op dit wiel met een factor 4 vergroot. Een kleinere vertraging betekent dus ook een kleiner koppel op het wiel; zie fig. 3.

Het resultaat is dat de motor bij elke constante rijsnelheid langzamer draait, met een hogere belasting (percentage van het maximaal leverbare koppel). Hij moet immers voor de gegeven rijsnelheid hetzelfde vermogen leveren, maar nu bij een lager toerental. Daardoor functioneert hij in een gebied met een hoger thermisch

Fig. 2. Als fig. 1, met toegevoegd een aantal lijnen van gelijk rendement. De figuur geldt (globaal) voor alle tot voor kort gangbare typen auto's.



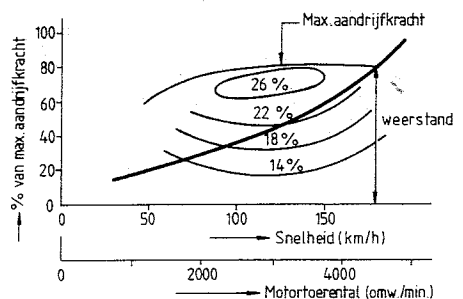
Ir. F. Oudendal (1922) studeerde Werktuigbouwkunde aan de Technische Hogeschool te Delft, alwaar hij in 1948 de ingenieurstitel behaalde. Hij werkte sedertdien bij Werkspoor N.V. te Amsterdam (locomotiefbouw), Continental Engineering te Amsterdam en Werkspoor-Utrecht N.V.

Sedert 1971 is hij in dienst van de Nederlandse Spoorwegen N.V., als chef van het Staforgaan 'Studie en Onderzoek'. Ir. Oudendal is lid van verscheidene nationale bestuurs-, advies- en normalisatiecommissies alsmede bestuurslid van de Afdeling Werktuig- en Scheepsbouw van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs.

rendement. Bij een bekend voorbeeld daalt het gemiddelde brandstofverbruik door deze ingreep van 7,0 tot 5,5 l/100 km, een verlaging van 22 procent. Dit gaat ten koste van een geringer vermogenoverschot bij lagere rijsnelheden: de auto gedraagt zich 'lui' en er moet vaker worden teruggeschakeld. Doordat echter het maximaal bereikbare motortoerental kleiner is geworden, kan een andere afstelling van de carburateur en van de kleppen en hun openingstijden worden gekozen, waardoor het koppel van de motor bij lagere en middelbare toerentalen groter is dan voorheen. Dit compenseert het verlies enigszins.

De volgende stap is aan de toekomst voorbehouden. Door de versnellingsbak te vervangen door een continu variabele transmissie (een zg. variator; men denke aan de Variomatic van DAF en zijn opvolgers) en de overbrengingsverhouding door een microprocessor zodanig te laten regelen dat de motor steeds draait bij het laagste toerental waarbij hij het gevraagde

Fig. 3. Als fig. 2, voor een auto met langzamer draaiende motor. Dit leidt tot een beter rendement. De ordinaatschaal is weer gebaseerd op de maximale aandrijfkraft die in de situatie van fig. 2 beschikbaar is.

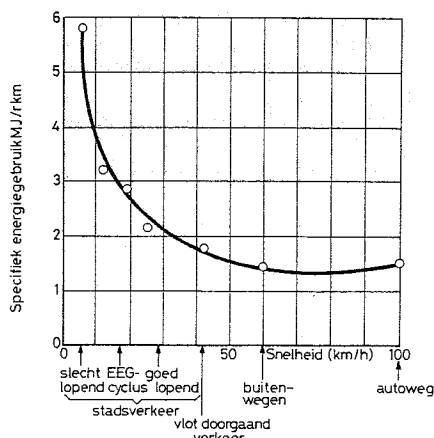


vermogen kan leveren, is nogmaals een rendementsverbetering van dezelfde orde van grootte te behalen. Experimenten in Nederland en Frankrijk bevestigden deze theorie. Helaas is een variator met het vereiste, grote regelgebied nog niet beschikbaar; het kan nog jaren duren voordat de levensduurproblemen van de proef-exemplaren zullen zijn overwonnen.

Voor vrachtauto's gelden dezelfde principes die hier voor personenauto's beschreven zijn. De luchtweerstandsfactor is door de ongunstige vormgeving hoger, vaak tussen 0,8 en 1,2; door toepassing van leischermen bovenop (en opzij van) de cabine is een brandstofbesparing van 5 tot 10 procent te bereiken. Ook het kiezen voor lagere motortoerentallen, ten koste van de trekkracht in de hogere versnellingen, heeft een dergelijke invloed. De door DAF geïntroduceerde VISAR, een indicatie voor de bestuurder of hij door op- of terugschakelen de motor in een werkgebied met een hoger rendement kan brengen, levert nogmaals een besparing van dezelfde orde van grootte. De werkelijke winst bij het goederenvervoer is echter te bereiken door verhoging van de gemiddelde beladingsgraad — de droom van elke transportondernemer —, maar dat is zonder nieuwe logistieke systemen niet te verwezenlijken. Te veel vrachtauto's rijden nog steeds leeg of gedeeltelijk geladen terug!

In het voorgaande is alleen gekeken naar de *technische* mogelijkheden om voertuigen met een lager brandstofverbruik te produceren. Zeker zo belangrijke besparingen kunnen worden bereikt door het instellen van zogenaamde groene golven op de hoofd-verkeersaders in de steden, zoals Kolar reeds in 1978 aantoonde; zie fig. 4. In het kader op blz. 146 wordt aangegeven dat éénmaal stoppen van 50 km/h evenveel energie verloren doet gaan als rijden over een afstand van circa 500 m met

Fig. 4. Het energiegebruik van personenauto's in verschillende verkeerssituaties. Men onderkent het desastreuze gevolg van een 'rode golf' in het stadsverkeer. (Ontleend aan J. Kolar, *Verkehr und Technik* 6, 1978.)



die snelheid. Ook het fileverkeer op auto-wegen heeft dergelijke gevolgen.

De in het bovenstaande beschreven wegvervoermiddelen, de personenauto en de bedrijfswagen, bestaan — zonder dat men zich dat nu nog realiseert — bij de gratie van twee reeds lang geleden verrichte uitvindingen: de verbrandingsmotor en de luchtband. Het wegvoertuig is voortgekomen uit wagens waarvan het trekdiër werd weggelaten en waarop (of waaronder) op de een of andere, meer of minder elegante wijze een motor en een transmissie werden geplaatst.

Ook zijn er ontwikkelingen geweest van stoomwagens, waarvan de stoommachine en de ketel vervangen werden door de verbrandingsmotor en de transmissie. Hierbij bleek dat de verbrandingsmotor, hoe aantrekkelijk ook i.v.m. de grote energieinhoud van de gasvormige- of vloeibare brandstof, waardoor een ongekende vergroting van de actieradius mogelijk werd, een groot bezwaar had t.o.v. de stoommachine: de onmogelijkheid om onder belasting gestart te kunnen worden. Het grote voordeel van het veel grotere thermische rendement ( $\eta = 15 \text{ à } 20\%$ ) van het (Carnot-)proces in één arbeidscilinder, waarin zowel het chemische-, als het fysische proces zich afspeelt, t.o.v. de ketel en de stoommachine, waarbij de 'verbranding' en 'expansie-arbeid' in twee gescheiden eenheden plaatsvinden (met  $\eta = 4 \text{ à } 5\%$ ), werd gekocht met het verlies van wat nu juist de stoommachine zo aantrekkelijk maakt: het soepel aanzetten onder belasting.

Gelijktijdig met de lange ontwikkelingsperiode van de verbrandingsmotor voor de wegvervoermiddelen en de railvoertuigen is er daardoor een vrijwel even lange en vaak moeilijke weg geweest van de ontwikkeling van de transmissie tussen de motor en de aandrijfwielen. In de jaren dertig werd bij de wegvoertuigen deze ontwikkeling gecombineerd met de uitvinding van de voorwielaandrijving (Citroën en DKW), waardoor toen al op uiterst inventieve wijze de weg naar de lichtere en kleine auto werd ingeslagen. De transmissie heeft ook de functie om min of meer onafhankelijk van de rijnsnelheid van het voertuig de verbrandingsmotor steeds in het gunstigste gebied van zijn brandstofverbruikdiagram te kunnen gebruiken.

Bij de personenauto's zijn de transmissies relatief eenvoudige eenheden. Bij vooral de grotere bedrijfswagens zijn de versnellingsbakken (eigenlijk vertrags-transmissie-eenheden), gecompliceerder. Alleen al het geruisloos en efficiënt bedienen daarvan is een vak op zich. Nu, na meer dan vijftig jaar van omvangrijke en vaak uiterst kostbare ontwikkelingen, zijn deze transmissies zo ver 'doorgeconstrueerd', dat in deze richting geen winst te bereiken is, ook niet op het gebied van de energiebesparing. Maar wij verwachten,

dat er nog wel energie te besparen zal zijn door de ontwikkeling van een continu-variable transmissie, niet alleen voor de (lichte) personenauto, maar juist ook voor de zwaardere wegvoertuigen, waarbij deze transmissie wordt belast met een hogere vermogensdichtheid (groot koppel en hoge hoeksnelheid).

Naar het zich laat aanzien, staat deze ontwikkeling op de drempel van toepassingen, niet alleen bij wegvoertuigen, maar ook in een wijder gebied, o.m. bij energiebesparingsprojecten. Het gaat hierbij om weg- en railvervoerprojecten waarbij getracht wordt om d.m.v. vliegwielininstallaties de nu in warmte omgezette en daardoor voor verder gebruik nutteloos geworden remenergie op te slaan als kinetische energie in een vlieg-wiel, om de energie te kunnen hergebruiken bij een volgende aanzet van het vervoermiddel.

Een continu-variable transmissie met hoge vermogensdichtheid kan een van de aantrekkelijke bouwelementen van deze vliegwielininstallatie's worden, inplaats van elektrische- of hydraulische overbrengingen. Beide laatstgenoemde vormen van overbrenging hebben het voordeel van een lange- en doorwrochte technische ontwikkeling, maar hebben het bezwaar van het meerdere malen moeten omzetten van energie: Van mechanische energie naar elektrische, danwel hydraulische energie, en omgekeerd, met de daaraan nu eenmaal verbonden verliezen. Bij toepassing ervan zou er veel verlieswarmte, op een bovendien dure manier, naar de omgeving gaan ('naar de vogels', zoals een bekend hoogleraar vroeger in Delft zei).

Het energiegebruik van de trein t.o.v. dat van de wegvervoermiddelen is grosso modo de helft per reizigerkilometer en per tonkilometer; zie fig. 5. Dit geldt — en dat wordt nogal eens vergeten — voor onze omstandigheden, onze snelheidspatronen, onze infrastructures (geen bergen); onze bezettingsgraden/beladingsgraden bij weg en rail.

Het zijn dus gemiddelden, waarvan de waarden kunnen verschuiven als bijv. de gemiddelde bezettingsgraad sterk zou stijgen of dalen.

Bij het goederenvervoer over de rail in bijv. de USA en Canada zijn de treinbelastingen veel groter dan in Europa, de snelheden aanzienlijk lager, terwijl over grote afstanden met een constante snelheid wordt gereden. Dientengevolge is daar, ondanks een doorgaans slechtere toestand van het spoor, het energiegebruik per netto tonkilometer nog weer eens globaal de helft lager dan in West-Europa.

Waardoor is de trein zuiniger met energie? Ten eerste door de lagere rolweerstand, minder dan 2 N per 1000 N wielbelasting.

### Primaire energie

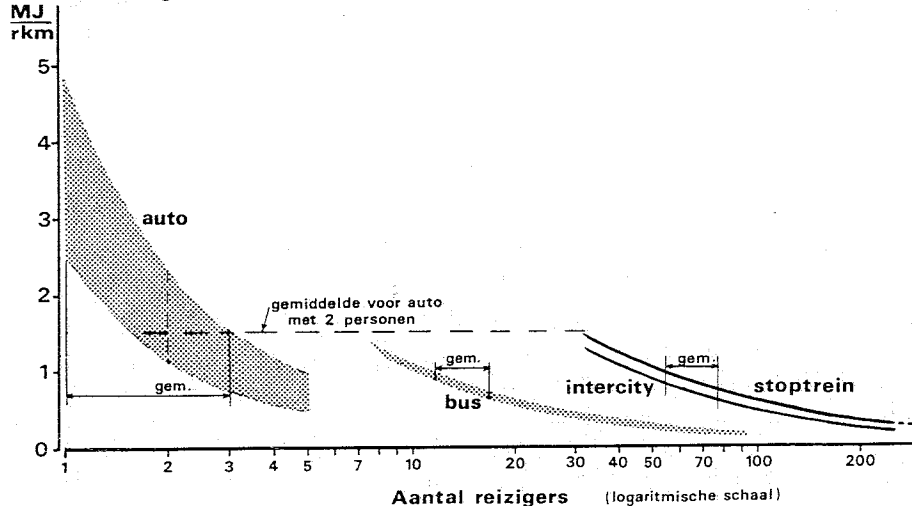


Fig. 5. Het gebruik aan primaire energie per reizigerskilometer van auto's, autobussen en treinen als functie van het aantal reizigers.

Ten tweede door de relatief lage luchtweerstand (o.m. door de treinvorming, waardoor er niet steeds opnieuw stuwweerstand optreedt, zoals bij een rij individuele wegvoertuigen) en ten slotte door de eigen baan, waarop (doorgaans) ongehinderd kan worden 'uitgerold'. De kinetische energie verzameld in de massa van de met een bepaalde snelheid zich voortbewegende trein, wordt hierbij benut om de rolweerstand, luchtweerstand, boogweerstand en hellingweerstand te (blijven) overwinnen.

Bij een wegvoertuig, dat een grotere rolweerstandsaandeel in de totale voertuigweerstand heeft, kan daardoor — overigens los van de verkeerssituatie — minder van dit uitrollen gebruik worden gemaakt.

Dit blijkt bijv. duidelijk bij de 'metro-sur-pneus', waarbij tot vlak voor het remmen voor een station elektrische stroom moet worden aangevoerd aan de tractiemotoren. Hier wordt het voordeel van de geringere geluidsproductie 'gekocht' met grote warmteverliezen in een groot aantal rubberbanden per trein. Een modern metrorijtuig met stalen wielen op stalen rails veroorzaakt bij een zorgvuldige constructie amper meer geluid dan de metro op rubberbanden, zeker boven een snelheid van 70 km/h, en gebruikt bovendien gemiddeld maar een derde van de elektrische energie. Hierbij is nog niet meegetrekkend de energie die nodig is om de ondergrondse ruimten op een leefbare temperatuur te houden bij zoveel verlieswarmte van de banden. Verder kan die warmte niet direct 'naar de vogels', maar moet worden afgevoerd met een geforceerde ventilatie en/of klimaatregeling.

Bij de railtechniek is in de tweede helft van de vorige eeuw en ook nog voor een belangrijk deel na 1900 de stoomlocomotief het overheersende trekpaard geweest. Bij de opkomst van de elektrische tram en van de verbrandingsmotor ont-

stonden elektrische- en verbrandingsmotortrjtuigen, -treinstellen en -locomotieven. Na de Tweede Wereldoorlog heeft het verdwijnen van de energetisch weinig aantrekkelijke en uiterst arbeidsintensieve stoomlocomotief zich snel voltrokken.

In de USA en Canada ging men vrijwel volledig over op diesellocomotieven. In Europa is er een uiterst gedifferentieerde ontwikkeling geweest van dieseltreinen, -treinstellen en -locomotieven, met daarnaast, of beter: daarboven, een ontwikkeling op grote schaal van de elektrische tractie.

Hierdoor heeft de railtechniek in ons land en in de ons omringende landen nu twee grote voordelen op het energiegebied in huis, namelijk het relatief lage specifieke energiegebruik van de trein en het vrijwel onafhankelijk zijn van vloeibare, minerale brandstoffen.

Worden nu deze voordelen, nationaal-economisch gezien, of bijv. binnen de EG, zoveel mogelijk benut? Het antwoord daarop is helaas negatief. Er is te zeer een sfeer van concurrentie tussen weg en rail, tussen de zgn. veel flexibeler auto en minder flexibele trein. Deze concurrentie is, zoals veel concurrentie, niet in alle opzichten een voordeel: een groter energieverbruik en ... een groter aantal verkeersslachtoffers.

Waarom is het wegvoertuig 'flexibel'? Omdat er een zeer fijnmazig wegennet is en er bijna overal brandstof kan worden gekocht; alles gericht op een ongebondeld vervoersproces, dat in ruime mate aan veel persoonlijke verplaatsingsbehoeften kan beantwoorden. Maar bij bundeling, niet alleen van verkeersstromen maar ook naar bestemming en in de tijd, is er een nog weinig benutte mogelijkheid van energiebesparing door meer gebruik te maken van het openbaar vervoer. Dit geldt niet alleen voor het personenvervoer, maar ook voor het goederenvervoer. In fig. 6 is dit voor verschillende vormen van het zgn. gecombineerde weg/railvervoer weergegeven. Het specifieke energiegebruik is aangegeven in wat genoemd is

### Energiegebruik voor het vervoer van 20 ton lading

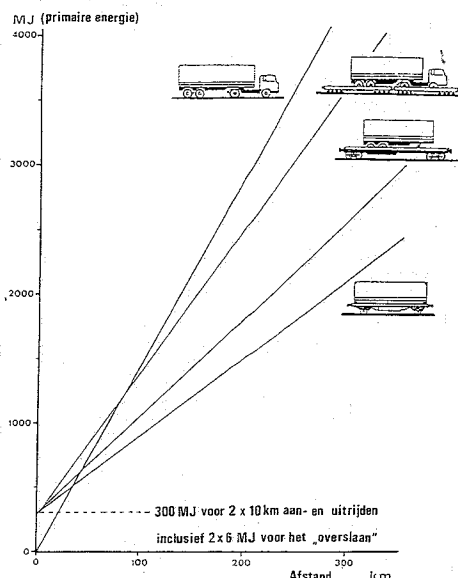


Fig. 6. Het gebruik aan primaire energie voor het vervoer van een lading van 20 ton als functie van de afstand waarover de lading moet worden vervoerd, voor vier methodes van vervoer.

'primaire energie'. Dit is bij de elektrische tractie van de trein teruggerekend naar het aardgas of de steenkolen op het rooster van de ketels van de elektrische centrales met een toeslag van 5 à 10% voor winning en transport. Bij de wegvoertuigen is de winning, het transport en de raffinage van de ruwe aardolie, alsmede de distributie eveneens met een toeslag meegerekend (10 à 15%).

Beide toeslagen zijn meegerekend om elektrische tractie en dieseltractie (over de weg) zo objectief mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken, daarbij teruggaande tot de drie minerale energievormen: steenkolen, aardolie en aardgas.

Fig. 5 en fig. 6 geven een algemeen beeld, dat door een andere keus van de uitgangspunten weinig of niet zal veranderen. De combinatie, en zeker de juiste combinatie, van weg- en railvervoer zowel bij het personen- als bij het goederenvervoer geeft de mogelijkheid van energiebesparing. Tot nu toe is de noodzaak daartoe beperkt geweest en is er dus aan deze mogelijkheid maar een beperkte aandacht besteed; misschien wel te weinig.

Het is echter juist zoals bij de eerder aangeduide vliegwielprojecten: Als niemand kan garanderen dat er niet opnieuw een energiecrisis situatie zal kunnen optreden, is het noodzakelijk om ontwikkelingen die een lange tijd vergen, toch in gang te zetten. Hebben wij deze mogelijkheden van energiebesparing plotseling echt nodig, dan ontbreekt de tijd voor het eerste ontwikkelingswerk.

Geven de genoemde ontwikkelingen ook nog de mogelijkheid aan de Nederlandse industrie om in de benodigde producten-innovaties te verwezenlijken, dan zijn de



inspanningen en de ontwikkelingskosten wel besteed geweest.

Uiteraard kan na het voorgaande de vraag gesteld worden: Als railvervoer de helft zuiniger is dan wegvervoer (dus bepaald uit jaarcijfers, niet uit individuele ritten), waarom worden er dan nog ontwikkelingen gestimuleerd om de railtechniek nog zuiniger te maken? Deze ontwikkelingen, zoals de toepassing van vermogenslektronica om efficiënter te kunnen aanzetten; vermijden van spanningsdalingen in de bovenleiding bij de elektrische tractie om de verliezen te verminderen; de eventuele toepassing van vliegwielininstallaties om remenergie te kunnen hergebruiken; verbeteren van de stroomlijning om de luchtweerstand te verminderen; toepassing van dubbeldekrijtuigen, waardoor het energiegebruik per reizigerkilometer aanzienlijk kan dalen enz. worden onderzocht en uitgevoerd om nog zuiniger met energie te kunnen zijn. De verwachting lijkt gerechtvaardigd, dat als alle zojuist genoemde mogelijkheden zijn verwezenlijkt (waarbij natuurlijk niet alle mogelijke besparingen te sommeren zijn), er t.o.v. het huidige gebruik een vermindering van 15% (en misschien wel 20%) te realiseren zal zijn. Dat is meer dan de moeite waard.

#### Literatuur

- W.A. Koumans en F. Oudendal, 'Energie, Verkeer en Vervoer', Openbaar Vervoer (1975) no. 3, blz. 62 t.m. 67.
- F. Oudendal, 'Geïntegreerd Weg- en Railtransport', Publikatie KIVI-NVI: Geïntegreerd Transport, Lezingencyclus 1976-1977, blz. 97 t.m. 113
- F. Oudendal, 'Het energiegebruik door het Openbaar Vervoer', Tijdschrift voor Vervoerwetenschap (1978), no. 3, Themanummer 'Transport en Energietoekomst', blz. 257 t.m. 272.
- F. Oudendal, 'De milieu-aspecten van het Railvervoer', Publikatie KIVI-NVI: De toekomst van het Railvervoer, Lezingencyclus (1978-1979), blz. 135 t.m. 151.
- F. Oudendal, 'Design Study for the Retrofitting of Flywheel Units (ESU's) under the Car Body of Existing Commuter Train Sets', EG-Publikatie Energy Conservation in Transport-New Engines and Flywheels, Proceedings of the Contractors' Meeting, Brussel, 21 en 28 oktober 1982, blz. 134 t.m. 148. (D. Reidel Publ. Cy., Dordrecht/Boston/Lancaster).

## Van gloeilamp naar SL- en PL-lamp

F.A.S. Ligthart

Wie vertrouwd is met de octrooiliteratuur betreffende compacte fluorescentielampen, weet dat sinds de introductie van de fluorescentielamp of 'TL' lamp<sup>[\*]</sup> eind van de jaren dertig, een niet aflatende stroom van voorstellen is gedaan om te komen tot een gloeilamp-vervangende 'TL' lamp. Waarschijnlijk werden vele uitvinders geïntrigeerd door de enorme afstand tussen het lichtrendement van gloeilampen (ca. 12 lm/W) en het lichtrendement van 'TL' lampen<sup>[\*\*]</sup> (ca. 50-80 lm/W). In dit artikel zal duidelijk worden gemaakt dat eerst door de ontwikkeling van een nieuwe generatie spectraal smalbandige fluorescentiepoeders in de jaren zeventig de weg is vrijgemaakt voor de ontwikkeling van efficiënte gloeilampvervangers met een goede kleurweergave.

Het ten opzichte van andere lamptypen betrekkelijk lage lichtrendement (12 lm/W) van een normale 75W-gloeilamp met een spiraaltemperatuur van ca. 2700 K, wordt veroorzaakt door het feit dat de gloeilamp zijn vermogen voornamelijk uitstraalt in de vorm van infraroodstraling; zie fig. 1. Slechts 8% van het vermogen wordt uitgestraald in het zichtbare gebied en daarvan valt nog de meeste straling in het diepe rood, waar de ooggevoeligheid gering is. In 'TL' lampen bevindt zich naast de damp (druk ca. 1 Pa) van het vrij aanwezige kwik krypton en/of argon (200-400 Pa) met soms neontoevoegingen. In de elektrische ontlading worden voornamelijk kwikatomen aangeslagen en geïoniseerd, terwijl het edelgas vrijwel alleen een rol speelt als buffergas. De kwikresonantiestraling van de kwik-edelgas-ontlading (voornamelijk *uv*-straling van 254 en 185 nm) wordt via fluorescentiepoeders ('fosforen') omgezet in zichtbaar licht. Via de keuze van de fosforen kan het spectrum van het uitgezonden licht van een 'TL' lamp in hoge mate naar wens worden aangepast.

Een eerste eis die aan compacte fluorescentielampen wordt gesteld, is dat het licht niet merkbaar verschilt van gloeilamplicht. Daartoe zijn een warme lichtkleur (kleurtemperatuur ca. 2700 K) en een goede kleurweergave ( $R_a \geq 80$ ) ver-

eist; zie het kader. Daarnaast dient het lichtrendement, uit economische overwegingen, globaal drie tot viermaal zo hoog te zijn als dat van een gloeilamp. Ten slotte dient de gloeilampvervangende fluorescentielamp een voldoende mate van compactheid te bezitten.

In het vervolg zal eerst worden nagegaan hoe aan deze verschillende eisen en/of wensen het best kan worden voldaan. Daarna zullen de PL- en SL-lamp kort worden besproken.

#### De nieuwe fosforen met smalle emissieband

Tot in het begin van de jaren zeventig werden voornamelijk de zgn. halofosfaatfosforen als fluorescentiepoeders in 'TL' lampen gebruikt. Enerzijds waren er standaard 'TL' lampen, zoals bijv. *Philips kleur 33*, met een hoog lichtrendement (ca. 80 lm/W) en een minder goede kleurweergave ( $R_a = 65$ ). Anderzijds waren er 'De Luxe'-lampen, zoals bijv. *Philips kleur 34*, met een goede kleurweergave ( $R_a = 85$ ) maar met een aanzienlijk lager rendement (ca. 50 lm/W). Bij de ontwikkeling van de fosforen voor deze lampen werd een emissiespectrum nagestreefd dat zoveel mogelijk het spectrum van een zwarte straler benaderde.

Door theoretisch werk van Koedam en Opstelten<sup>[1]</sup> bij Philips, en Thornton<sup>[2]</sup> bij Westinghouse is dat concept van het gewenste spectrum aanzienlijk veranderd. Met behulp van computer-berekeningen toonden zij aan dat een combinatie van drie smalle emissielijnen in het rood, groen en blauw, mits juist gesitueerd,

Fig. 1. Vermogensbalans (in watt) van de standaard 75 W Argenta gloeilamp.

Opgenomen vermogen 75 W			
zichtbare straling (900 nm)	infrarood-straling met golflengte < 2,8 μm	geleiding en konvektie in de lamp, infrarood-straling met golflengte > 2,8 μm	
	45	24	
		omzetting aan wand	
		warmte 24	
		straling	konvektie
		16	8
totaal warmte 69			

[\*] 'TL' is een merknaam van Philips.

[\*\*] De opgegeven lichtrendementen in lumen/Watt gelden voor de toen gangbare TL 40 W-lampen, exclusief de verliezen in het voorschakelapparaat. De huidige TLD 36W-lampen bezitten een lichtrendement van ca. 93 lm/W.